

Hans Brümmer

Wie funktioniert die
Digitalfotografie?

Eine Einführung in
technische Grundlagen

Hans Brümmer

Wie funktioniert die Digitalfotografie?

Eine Einführung in technische Grundlagen

Der Inhalt dieses Werkes steht unter einer Creative Commons Lizenz. Diese Lizenz erlaubt es, unter folgenden Bedingungen den Inhalt zu vervielfältigen und zu verbreiten: Der Name des Autors/Rechtsinhabers muss genannt werden. Dieser Inhalt darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden. Der Inhalt darf nicht bearbeitet oder in anderer Weise verändert werden. Dies ist eine Lizenz, die auf der internationalen Creative Commons-Initiative basiert.

Um den Vertragstext der Lizenz einzusehen, folgen Sie bitte dem Hyperlink: creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/

Version 1.0 / 2015

Autor und Verlag:

Prof. Dr. Hans Brümmer
Steinberg 12
D-31832 Springe

www.HansBruemmer.de

hb@HansBruemmer.de

| | |
|---|-----------|
| 0. Wie alles begann | 6 |
| 1. Die Sache mit der Auflösung..... | 8 |
| 1.1 Wie viele Pixel sind erforderlich?..... | 8 |
| 1.2 Anforderungen an die Druckqualität..... | 9 |
| 1.2.1 Schärfe | 9 |
| 1.2.2 Die Auflösung von Rasterbildern (Offsetdruck)..... | 10 |
| 1.2.3 Bildpunkte (pixel) und Druckerpunkte (dots)..... | 12 |
| 1.2.4 Tintenstrahl- und Laserdrucker..... | 14 |
| 1.3 Farbdruck..... | 16 |
| 2. Scanner..... | 18 |
| 2.1 Prinzip der Scanner | 18 |
| 2.2 Wie viel Auflösung ist erforderlich? | 20 |
| 2.3 Auswirkung der Unterabtastung (Aliasing)..... | 22 |
| 2.4 Der Dichteumfang | 23 |
| 3. Digitalkameras | 25 |
| 3.1 Zusammenhang zwischen Auflösung und Bildformaten..... | 27 |
| 3.2 Speicherformate..... | 29 |
| 4. Die Digitalisierung..... | 30 |
| 5. Grundbegriffe des Farbmanagements | 34 |
| 5.1 Was ist Farbe?..... | 35 |
| 5.2 Probleme des Farbmanagements..... | 38 |
| 5.3 Licht und Farbe..... | 39 |
| 5.4 Farbmischung..... | 40 |
| 5.4.1 Die additive Farbmischung | 41 |
| 5.4.2 Die subtraktive Farbmischung..... | 43 |
| 5.5 Der sechsteilige Farbkreis..... | 45 |
| 5.6 Die Farbdarstellung im Computer | 46 |
| 5.7 Farbmodelle | 48 |
| 5.7.1 Das HSB-Farbmodell..... | 48 |
| 5.7.2 Das CIE-Yxy-Farbmodell..... | 49 |
| 5.7.3 Das CIE-L*a*b*-Farbmodell | 50 |
| 5.8 Monitor-, Druck- und Arbeitsfarbräume..... | 52 |
| 5.9 Farbraumtransformationen (gamut mapping) | 55 |
| 5.10 ICC-Profile..... | 57 |
| 6. Speichern und Archivieren von Bilddaten | 61 |
| 6.1 Dateiformate..... | 62 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 6.1.1 | Das TIFF-Format..... | 63 |
| 6.1.2 | Das JPEG-Format | 64 |
| 6.1.3 | Das RAW-Format..... | 65 |
| 6.1.4 | Der PDF/A-Standard und seine Ziele..... | 67 |
| 6.2 | <i>Die Archivierung digitaler Daten</i> | <i>68</i> |
| 6.3 | <i>Archive und Bilddatenbänke</i> | <i>70</i> |
| 6.3.1 | Speichermedien und ihre Haltbarkeit | 71 |
| 6.3.2 | Auswahl der Speichertechnologie..... | 73 |
| 6.3.3 | Analyse aktueller Speichertechnologien | 74 |
| 6.4 | <i>Strategien für eine digitale Langzeitarchivierung.....</i> | <i>77</i> |
| 7. | Der Tinten(strahl)druck | 79 |
| 7.1 | <i>Das Verfahren.....</i> | <i>79</i> |
| 7.2 | <i>Prinzipien</i> | <i>80</i> |
| 7.2.1 | Tropfenerzeugung durch Piezo-Wandler..... | 81 |
| 7.2.2 | Tropfenerzeugung durch Heizelemente | 82 |
| 7.2.3 | Continuous-Flow-Verfahren | 82 |
| 7.3 | <i>Eigenschaften der Tinten</i> | <i>84</i> |
| 7.4 | <i>Tintenarten.....</i> | <i>86</i> |
| 7.4.1 | Farbstofftinten..... | 87 |
| 7.4.2 | Pigmenttinten | 88 |
| 7.4.3 | Wachstinten..... | 88 |
| 7.4.4 | Tinten für Schwarzweißdrucke..... | 89 |
| 7.4.5 | Textiltinten..... | 90 |
| 7.4.6 | Alternative Tinten..... | 90 |
| 7.5 | <i>Farbunterschiede beim Tintendruck.....</i> | <i>90</i> |
| 7.6 | <i>Papiere für den Tintendruck.....</i> | <i>91</i> |
| 7.6.1 | Normalpapier..... | 92 |
| 7.6.2 | Spezialpapiere | 93 |
| 7.6.3 | FineArt-Papiere..... | 94 |
| 7.6.4 | Digitale Bilder auf Fotopapier..... | 95 |
| 7.7 | <i>Beständigkeit der Drucke.....</i> | <i>96</i> |
| 7.8 | <i>Bestimmung der Lichtbeständigkeit.....</i> | <i>97</i> |
| 7.8.1 | Die konventionelle Prüfung der Lichtechtheit..... | 98 |
| 7.8.2 | Die Prüfung der Lichtechtheit nach Henry Wilhelm..... | 99 |
| 7.8.3 | Sonstige Prüfverfahren | 100 |
| 7.8.4 | Vergleichende Untersuchungen | 101 |
| 8. | Glossar | 103 |
| 9. | Quellen..... | 103 |

Über dieses eBook

Für viele Benutzer ist eine Digitalkamera eine Blackbox, die auf undurchschaubare Weise Bilder erzeugt. Während man in der Zeit der analogen Fototechnik noch Begriffe wie Belichtungszeit und Blende zumindest kannte, fotografiert man heute – unbelastet von technischem Wissen – einfach drauf los. Das Ergebnis ist eine riesige Bilderflut, oft *visuelles fast-food*. Um einzelne Bilder in der Menge wieder „sichtbar“ zu machen, werden häufig die technischen Möglichkeiten der Bildbearbeitung benutzt. Das Ergebnis sind oft grelle, unnatürliche Bildeffekte.

Dieses Buch ist keine „Fotoschule“ und die Kenntnis der beschriebenen Zusammenhänge ist für die Bedienung digitaler Kameras nicht erforderlich. Die Zielgruppe sind Fotografen, welche die technischen Zusammenhänge verstehen möchten.

Grundlage dieses Buches sind Vorträge und Veröffentlichungen, die über einen Zeitraum von etwa 10 Jahren entstanden. In dieser Zeit setzte sich die Digitalfotografie endgültig durch und die filmbasierte Fototechnik wurde zum Nischenprodukt.

Die in diesem Text enthaltenen Informationen wurden aus vielen Quellen zusammengestellt, soweit möglich, mit Quellenangabe. Sollte ich dabei (unabsichtlich) ein Copyright verletzt haben, bitte ich um Mitteilung.

Diese Seiten sind im Sinne einer populär-wissenschaftlichen Darstellung entstanden. Ziel ist die Erkenntnis: „Ach, so geht das“. Hinweise auf bestimmte Programme – zum Beispiel zur Bildbearbeitung – wurden bewusst vermieden. Durch die schnelle Entwicklung der Technik ist nicht auszuschließen, dass die Beschreibungen nicht immer dem letzten Stand der Technik entsprechen.

Die Formatierung dieses *eBooks* wurde so gewählt, dass es auf normalen *Tablet Computern* gut lesbar ist. Die zahlreichen Links führen, sofern eine Verbindung zum Internet besteht, direkt zu entsprechenden Webseiten. Für die Bereitstellung der Informationen sei den Autoren gedankt.

Trotz sorgfältiger Durchsicht schleichen sich manchmal Fehler ein. Für Hinweise und Anregungen bin ich dankbar.

Hans Brümmer

0. Wie alles begann

Produkte werden manchmal für einen völlig anderen Zweck entwickelt, als den, für den sie später benutzt werden. Die in den Digitalkameras für die Bilderfassung verwendeten CCD-Sensoren (CCD = charge coupled device) wurden ursprünglich für die Datenspeicherung entwickelt. Man bemerkte jedoch sehr schnell, dass diese Bauelemente lichtempfindlich sind und es relativ einfach ist, damit zweidimensionale Bilder zu erfassen. Für die Erfindung des CCD-Sensors wurden Willard Boyle und George E. Smith 2009 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. Im Jahr 1973 entwickelte die Firma Fairchild Imaging in den USA den ersten kommerziell verwendbaren Sensor mit einer Auflösung von 100x100 Pixeln (0,01 Megapixel).



Abb. 1.1: Steven J. Sasson mit seiner "Hand-held-Camera"

In der Geschichte der Digitalkameras¹ gab es seit 1963 verschiedene Versuche, Bilder elektronisch (also ohne Film) aufzunehmen und zu speichern. Dabei handelte es sich um „Still-Video-Kameras“, die bewegungs-

¹ <http://www.prophoto-online.de/geschichte-der-fotografie/Die-digitale-Revolution-Wer-hats-erfunden-10007507>

lose Bilder machten und diese als Einzelbilder in einem Videoformat auf rotierende Magnetscheiben speicherten. Zu den bekanntesten Vorgängern der digitalen Kameras gehörte die Sony Mavica (Magnetic Video Camera).

1975 ist das Geburtsjahr der ersten „richtigen“ Digitalkamera, die von Steven J. Sasson bei Kodak entwickelt wurde (Abbildung 1.1²). Sie verwendete den 100x100-CCD-Sensor von Fairchild, wog ca. 3,8 kg und benötigte 23 Sekunden, um ein Bild auf einer Magnetbandkassette zu speichern. Es sind keine Bilder überliefert, die mit der geringen Auflösung aufgenommen wurden. Bekannt wurde das Bild in Abbildung 1.2, das Bestandteil eines 1975 erstellten Technical Reports war. Zu dieser Zeit war bereits ein Sensor mit 320x512 Pixeln verfügbar.



Abb. 1.2: Erstes veröffentlichtes Foto mit 320 x 512 Pixeln

Kodak hat die Fotografie zum weltweit verbreiteten Massenmedium gemacht. Mit dem Slogan „You press the bottom, we do the rest“ vermarktete Kodak zugleich den eigenen Entwicklungsdienst. Es ist eine Ironie der Geschichte, dass die erste Digitalkamera bei Kodak entwickelt wurde. Das Unternehmen hielt sie jedoch unter der Decke, um sich das Geschäft mit den Fotofilmen nicht zu verderben. Steven J. Sasson erhielt 2008 den Kulturpreis der Deutschen Gesellschaft für Photographie. Im Jahre 2012 meldete die Firma Kodak Konkurs an. Dieses ist ein Lehrstück darüber, wie ein Pionier von gestern durch die Pioniere von heute abgehängt wird.

1. Die Sache mit der Auflösung

1.1 Wie viele Pixel sind erforderlich?

Man sagt „viel hilft viel“. Und: „Eine Digitalkamera mit 12 Millionen Pixeln³ muss also besser sein, als eine mit 6 Millionen“. Dieser Ansicht sind viele Käufer von Digitalkameras. Dieses stimmt leider nicht, wenn es sich um eine Kompaktkamera handelt. Die Begründung liefern Mitarbeiter der Firma *Image Engineering*, einem unabhängigen Testlabor, das unter anderem die Tests für die Zeitschriften *Color Foto* und *c't* durchführt. Die folgenden Hinweise wurden der Website⁴ entnommen.

1995 hatten die ersten Kompaktkameras noch eine sehr geringe Pixelzahl und die gedruckten Bilder waren unansehnlich. Die im Jahr 1998 erreichten 2 Megapixel reichten für den Druck auf 10cm x 15cm in brauchbarer Qualität aus. 2004 besaßen die Kompaktkameras 6 Megapixel, was nach Meinung von Experten unter üblichen Aufnahmebedingungen einer durchschnittlichen Aufnahme auf Kleinbildfilm entsprach. Die ab 2005 erschienen Modelle mit 8 Megapixeln zeigten bei mäßigen Lichtverhältnissen starke Bildstörungen durch Rauschen⁵ und die Abbildungsfehler der Objektive traten immer mehr hervor.

Der Grund liegt in den sehr kleinen Bildsensoren, die bei steigender Pixelzahl immer weiter unterteilt werden. Dadurch erhalten die einzelnen Pixel immer weniger Licht, wodurch die Lichtempfindlichkeit der Kamera abnimmt. Die dadurch erforderliche hohe Signalverstärkung verstärkt auch das Rauschen.

Die erhöhte Auflösung erfordert auch Objektive mit einer höheren Auflösung und geringeren Abbildungsfehlern. Bessere Objektive sind komplizierter aufgebaut und somit teurer, was der Forderung nach kleinen und preiswerten Kameras zuwider läuft.

Ein guter Kompromiss für eine Kompaktkamera ist ein Sensor mit 6 Millionen Pixeln oder besser eine Pixelgröße von $> 3\mu\text{m}$. Bei digitalen

3 Pixel (picture element), Bildpunkt. Jedes Pixel repräsentiert eine Farbinformation, die sich aus einem roten, einem grünen und einem blauen Bestandteil zusammensetzt.

4 <http://6mpixel.org>

5 Als Rauschen bezeichnet man Störungen im digitalen Bild, die nicht auf das Signal, also die aufgenommene Lichtmenge, sondern auf Störungen bei dessen Übertragung zurückzuführen sind. Sie machen sich in Form von Helligkeitsschwankungen vornehmlich in den dunklen Bildbereichen oder als Farbflecken im Bild bemerkbar.

Spiegelreflexkameras (DSRs) sind die Sensoren bzw. Pixel sehr viel größer. Dadurch werden die Kameras lichtempfindlicher und zeigen geringeres Rauschen. Deren hochwertige Objektive liefern die notwendige Auflösung und die Kameras sind auf große Datenmengen ausgelegt.

Bevor das Prinzip der Digitalisierung und die technische Besonderheiten der digitalen Fotografie behandelt werden, soll gezeigt werden, dass sich die erforderliche Anzahl von Bildpunkten aus den menschlichen Sehgewohnheiten ableiten lässt.

Dieses Kapitel behandelt einige Abhängigkeiten zwischen dem Druck des fertigen Bildes und der digitalen Bilderfassung. Dabei wird im Besonderen der Zusammenhang zwischen der erforderlichen Auflösung beim Drucken und bei der Bilderfassung erläutert. Die Qualität digitaler Aufnahmen muss in der Regel auf das vorgesehene Ausgabeformat und das Druckverfahren abgestimmt sein. Daher wird mit den Problemen beim Druck – also mit den Anforderungen an das gewünschte Ergebnis – begonnen. Bei dieser vereinfachten Darstellung geht es vor allem um Anschaulichkeit. Die Zusammenhänge werden zunächst am Beispiel von schwarzweißen Bildern dargestellt und später auf farbige Darstellungen erweitert.

1.2 Anforderungen an die Druckqualität

1.2.1 Schärfe

Die Schärfe eines Fotos bzw. wichtiger Motivbereiche sowie die deutlich voneinander getrennte Wiedergabe feiner Einzelheiten hat für viele Anwender Priorität. Schärfe ist ein relativer Begriff, der u. a. vom Betrachtungsabstand und vom persönlichen Empfinden abhängig ist. Hinzu kommt, dass ein kontrastreiches Motiv schärfer erscheint als ein Motiv mit geringeren Kontrasten.

Der Schärfeeindruck wird durch das begrenzte Auflösungsvermögen unseres Auges bestimmt. Da die absolute Größe der noch aufgelösten Objektdetails vom Betrachtungsabstand abhängt, gibt man den *minimalen Sehwinkel* an, unter dem z.B. zwei Punkte oder Linien noch getrennt erkannt werden. Das Auflösungsvermögen hängt auch von der Form der Objekte, dem Kontrast und der Beleuchtungsstärke ab. Der minimale Sehwinkel

kel beträgt bei *sorgfältiger Beobachtung* etwa 2 Bogenminuten⁶.

Bei einem Betrachtungsabstand von 25 cm (der *Bezugssehweite*) kann man zwei Punkte mit einem Abstand von etwa 0,15 mm gerade noch getrennt wahrnehmen. Beim *bequemen Sehen* verdoppelt sich dieser Wert auf etwa 0,3 mm. In der Fotografie werden für die Beurteilung der Auflösung von Objektiven oder Filmen Testvorlagen mit schwarzen und weißen Linien mit einer veränderlichen Linienzahl pro Millimeter verwendet. Das menschliche Auge hat bei der *Bezugssehweite* nur eine Auflösung von 3...5 Linienpaaren pro Millimeter.

Der Schärfeeindruck ist also vom Betrachtungsabstand abhängig. Als normale Betrachtungsentfernung, die gewöhnlich nicht unterschritten wird, legt man bei hinreichend großen Bildern die Bilddiagonale fest. Erscheint ein Bild von beispielsweise 18cm x 24cm (Bilddiagonale \approx 30 cm) bei einem Betrachtungsabstand von 30 cm scharf, so wird dieses auch bei stärkerer Vergrößerung scharf erscheinen. Die einzelnen Bildpunkte werden dadurch zwar größer, der Schärfeeindruck ändert sich wegen des größeren Betrachtungsabstandes aber nicht – der Sehwinkel hat sich für den einzelnen Bildpunkt nicht geändert.

Diese Betrachtungen gelten nicht mehr bei Ausschnittvergrößerungen, da diese dann i. a. aus einer viel zu geringen Distanz betrachtet werden. Wenn dabei das gesamte Negativ auf beispielsweise 30cm x 40cm vergrößert wurde (Bilddiagonale \approx 50 cm), müsste auch die Ausschnittvergrößerung aus einer Entfernung von 50 cm betrachtet werden; dann bliebe der Schärfeeindruck der gleiche.

1.2.2 Die Auflösung von Rasterbildern (Offsetdruck)

Aus wirtschaftlichen Gründen wird die Auflösung eines Bildes beim Drucken nur so hoch gewählt, wie es für die jeweilige Anwendung erforderlich ist. Die Frage nach der angemessenen Auflösung eines Bildes musste vom grafischen Gewerbe bereits vor über einhundert Jahren behandelt werden, als damit begonnen wurde, Bilder mit Halbtönen detailreich zu drucken.

Betrachtet man ein Schwarzweißfoto in einer Zeitung mit Hilfe einer Lupe, so wird man erkennen, dass nur mit schwarzer Farbe gedruckt wird.

6 Eine Bogenminute ist der sechzigste Teil eines Winkelgrads

Grauwertabstufungen zwischen Weiß und Schwarz werden mit Rasterpunkten simuliert, die in einem gleichmäßigen Abstand angeordnet sind. Für die Darstellung heller Flächen sind die Punkte kleiner, für die Darstellung dunkler Flächen entsprechend größer. Der Grauwert entsteht für den Betrachter durch das Verhältnis zwischen der Punktgröße und der Größe der unbedruckten weißen Papierfläche.



Abb. 1.3: Nachbildung von Grauwertabstufungen durch Rasterpunkte (stark vergrößert)



Abb. 1.4: Vergrößertes Zeitungsfoto

Dieses Verfahren nach Abbildung 1.3 und 1.4 erfordert ein hinreichend feines Druckraster; je feiner das Raster, um so eher gleicht das Druckresultat einer Halbtonfotografie mit vielen Grautönen. Die mindestens notwendige Zahl der Rasterpunkte ergibt sich aus dem Auflösungsvermögen des menschlichen Auges. Bei einem Betrachtungsabstand von 25 cm sollte die Rasterstruktur nicht sichtbar sein. Im vorigen Abschnitt wurde dargestellt, dass zwei Punkte im Abstand von etwa 0,3 mm beim bequemen Sehen gerade noch getrennt erkannt werden können.

Ein Druckraster mit etwa drei Punkten pro Millimeter kann also gerade noch wahrgenommen werden. Für den Druck auf Zeitungspapier

(*Offsetdruck*⁷) werden 3 - 4 Punkte verwendet, was man mit Hilfe eines Lineals und einer Lupe leicht nachprüfen kann. Die im Kunstdruck übliche Rasterweite von mindestens 150 Linien pro inch (6 - 7 Linien bzw. Punkte pro mm) trennt das Auge nicht mehr.

Die Rasterweite wird üblicherweise angegeben in lpi (Linien pro inch, 1 inch \approx 2,54 cm) oder lpcm (Linien pro cm). Die Feinheit des Rasters richtet sich vor allem nach dem Papier. Weniger glatte Papiere verlangen gröbere, Kunstdruckpapiere erlauben feinere Raster. Die Wahrnehmung des Punktmusters wird deutlich reduziert, wenn man das Druckraster diagonal anordnet (Rasterwinkelung 45°). Abbildung 1.4 zeigt die vergrößerte Reproduktion eines Zeitungsfotos. Bei der konventionellen Rasterung werden Bilder in Form von Punkten gleichen Abstandes und variabler Größe wiedergegeben.

Beim Übergang zur digitalen Fotografie ist es hilfreich, den Begriff Rasterpunkt durch Bildpunkt (engl.: picture element = pixel) zu ersetzen. Damit kann neben dem Begriff Rasterweite der im Rahmen der Fotografie anschaulichere Begriff Bildpunkte/inch (pixel per inch = ppi) bzw. Bildpunkte/cm (pixel pro cm = ppcm) verwendet werden.

1.2.3 Bildpunkte (pixel) und Druckerpunkte (dots)

Orientiert man sich am Kunstdruck, erhält man für den Druck digitaler Bilder einen von der Praxis bestätigten Richtwert:

Mindestauflösung beim Druck digitaler Fotos = 150 ppi
 150 ppi \approx 60 Bildpunkte / cm \approx 6 Bildpunkte / mm

Die in der digitalen Fotografie überwiegend eingesetzten Tintenstrahl- und Laserdrucker verwenden zur Erzeugung eines Bildpunktes ein feines Mosaik winziger *Druckerpunkte* (dot = Punkt oder Pünktchen) gleicher Größe, aber unterschiedlicher Anzahl (Abbildungen 1.5 und 1.6). Der nicht genormte Begriff *Druckerpunkt* für *dot* wird hier verwendet, um ihn eindeutig von den Bildpunkten abzugrenzen.

7 <http://de.wikipedia.org/wiki/Offsetdruck>

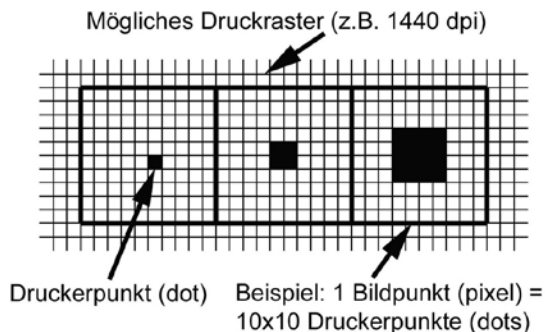


Abb. 1.5: Nachbildung der Bildpunkte des Offsetdrucks

Die Bildpunkte werden als Pixel (picture element) bezeichnet und die Auflösung in ppi (pixel per inch) oder ppcm (pixel pro cm) angegeben. Ein Pixel ist die kleinste Bildeinheit, die mit einem Bildverarbeitungssystem aufgenommen, verarbeitet und ausgegeben werden kann. Jeder Pixel weist eine bestimmte Farbe oder Tonwert auf. Sind die Pixel hinreichend klein, so verschwimmen diese im Auge zum kontinuierlichen *Halbtonbild*.

Die Begriffe *pixel* und *dot* sollten unbedingt auseinander gehalten werden – leider werden diese in technischen Unterlagen und Veröffentlichungen häufig verwechselt.

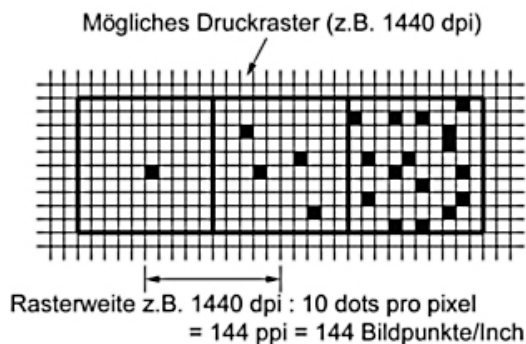


Abb. 1.6: Streuung der Druckerpunkte

1.2.4 Tintenstrahl- und Laserdrucker

Die Druckverfahren der *Tintenstrahl*⁸- und *Laserdrucker*⁹ sind binäre Prozesse, d.h. es wird entweder Farbe auf den Träger gedruckt oder nicht. Die Erzeugung von Graustufen erfolgt über das Mosaik der Druckerpunkte (dots), diese schaffen die optische Illusion eines Grauwertbildes.

Tintenstrahl- und Laserdrucker besitzen eine hohe Ausgabeauflösung, die in dots per inch (dpi) angegeben wird; sie beträgt bei Laserdruckern z.B. 600 dpi oder 1.200 dpi. Moderne Tintenstrahldrucker arbeiten z. B. mit 1.440 dpi oder 2.880 dpi. Diese Ausgabeauflösung bestimmt die Feinheit des möglichen Druckrasters.

Die Änderung der Bildpunktgröße beim Offsetdruck kann durch eine Druckmatrix nach Abbildung 1.5 nachgebildet werden. Durch Zusammenfügen mehrerer Druckerpunkte (dots) wird der einzelne Bildpunkt (pixel) schrittweise aufgefüllt. Die Bildpunktgröße in den Beispielen wurde mit 10 x10 Druckerpunkten willkürlich gewählt. In der Praxis stellt man im Bildverarbeitungsprogramm die gewünschte Rasterweite des Drucks ein (z.B. 150 ppi) und die Software bestimmt daraus die Größe der Matrix (des pixels).

Mit einer 10x10-Matrix können 101 verschiedene Grauwerte erzeugt werden (1 Wert für das unbedruckte Papier). Die 10x10-Matrix wurde in den Abbildungen 1.5 und 1.6 als fette Bildpunktumrandung hervorgehoben.

$$\begin{aligned} & \text{Anzahl der möglichen Grauwerte} \\ = & \text{Anzahl der Druckerpunkte (dots) pro Bildpunkt (pixel)} + 1 \\ = & (\text{Druckraster} : \text{Rasterweite})^2 + 1 \end{aligned}$$

Laserdrucker setzen die unterschiedlich großen Bildpunkte aus einzelnen Druckerpunkten nach Abbildung 1.5 zusammen, wobei die Form der Punkte abgerundet ist. Tintenstrahldrucker verwenden ein raffinierteres Verfahren zur Erzeugung stufenloser Tonwertübergänge. Sie verteilen die dem Grauwert entsprechende Anzahl von Druckerpunkten innerhalb der Bildpunktmatrix ungleichmäßig (Abbildung 1.6). Die einzelnen Druckerpunkte sind dann bei einem normalen Betrachtungsabstand nicht mehr zu

8 <http://de.wikipedia.org/wiki/Tintenstrahldrucker> , http://www.hansbruemmer.de/tl_files/pdf-ordner/tintendruck.pdf

9 <http://de.wikipedia.org/wiki/Laserdrucker>

erkennen und es ergibt sich ein *photorealistischer Eindruck*.

Welche Ausgabeauflösung (dpi) benötigt ein Drucker, um die Qualität des Kunstdrucks zu erreichen? Diese Frage soll an Beispielen eines typischen Laser- sowie eines Tintenstrahldruckers untersucht werden. Dabei ist zu fordern, dass neben einer hohen Auflösung auch feine Tonwertabstufungen erzeugt werden. Es sollten mindestens 100 bis 150 Graustufen bzw. Tonwertstufen je Grundfarbe vorhanden sein.

Beispiel 1.1:

Ein Schwarzweiß-Laserdrucker arbeite mit einer Ausgabeauflösung von 600 dpi. Verwendet der Drucker eine Rastermatrix von 10 x 10 Druckerpunkten (dots), so stehen

$$\begin{aligned} & (600 \text{ dots / inch}) : (10 \text{ dots / pixel}) \\ & = 60 \text{ pixel / inch} \approx 2,4 \text{ Bildpunkte / mm} \end{aligned}$$

zur Verfügung. In Abschnitt 1.2.2 wurde beschrieben, dass beim Zeitungsdruck mit einer Rasterweite von etwa 3 - 4 Linien bzw. Pixeln pro Millimeter gedruckt wird. 2,4 Bildpunkte pro mm entsprechen also nur einer schlechten Zeitungsqualität. Diese Abschätzung zeigt, dass ein Laserdrucker mit einer Ausgabeauflösung von 600 dpi für den Druck detailreicher Fotos ungeeignet ist. Mit der 10x10-Matrix können 101 Grauwerte dargestellt werden.

Benutzt der Drucker eine 8x8-Matrix, so ergeben sich 3 Bildpunkte pro mm. Die Anzahl der Graustufen sinkt auf 65; dieses ist etwa die untere Grenze für stufenlose Tonwertübergänge.

Beispiel 1.2:

Bei einem Tintenstrahldrucker mit einer Ausgabeauflösung von 1440 dpi ergibt sich folgende Rechnung:

$$\begin{aligned} & (1440 \text{ dots / inch}) : (10 \text{ dots / Pixel}) \\ & = 144 \text{ pixel / inch} \\ & \approx 5,8 \text{ Pixel / mm} \end{aligned}$$

Dieser Wert kommt der für Kunstdruck anzustrebenden Auflösung von 150 Bildpunkten/inch bzw. 6 - 7 Bildpunkten/mm nahe. Da Tintenstrahl-

drucker ihre Punkte nach Abbildung 1.6 statistisch streuen, kann man hier schon von einem *foto-realistischen* Druck sprechen.

Beim Drucken geht man üblicherweise so vor, dass beim Scannen oder bei der Bildverarbeitung festgelegt wird, mit welcher Auflösung gedruckt werden soll. Der Druckertreiber errechnet daraus die erforderliche Größe der Druckmatrix bzw. des Bildpunktes

1.3 Farbdruck

Bei der näheren Betrachtung eines *farbigen Zeitungsbildes* stellt man fest, dass das Bild aus einzelnen Rasterpunkten der subtraktiven Grundfarben Cyan (Blaugrün), Magenta (Blaurot) und Yellow (Gelb = Rotgrün) sowie Schwarz besteht. Die zusätzlichen schwarzen Punkte werden zugegeben, da die übereinander gedruckten farbigen Punkte kein reines Schwarz ergeben. Diese Prozessfarben für den Farbdruck werden kurz als CMYK bezeichnet, wobei K für Black steht.

Die einzelnen Druckraster sind um den *Rasterwinkel* gegeneinander verdreht, um das Entstehen von *Moiré-Mustern* bei regelmäßigen Bildstrukturen zu minimieren. An den Stellen, wo sich alle vier Raster schneiden, entstehen *Rosettenmuster* (Abbildung 1.7).

Bei Tintenstrahldruckern werden die Druckerpunkte der vier Farben wieder statistisch innerhalb der Matrix des Bildpunktes verteilt (Abbildung 1.6), was die Tonwertübergänge gegenüber dem Rasterdruck wesentlich verbessert.

Spezielle Tintenstrahldrucker für den Fotodruck benutzen neben den Prozessfarben CMY die zusätzlichen Farben Hellicyan und Hellmagenta, wodurch die drucktechnische Wiedergabe der menschlichen Hautfarbe verbessert wird.

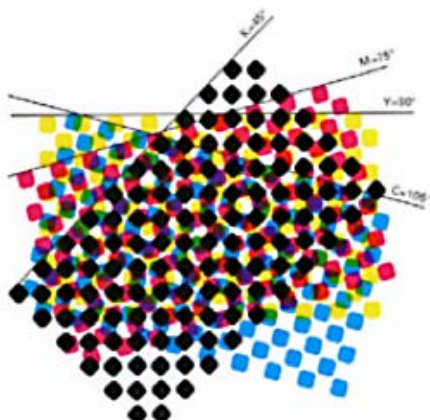


Abb. 1.7: Farbraster des Vierfarbendrucks (Zeitungsdruck)

2. Scanner

2.1 Prinzip der Scanner

Die Betrachtungen zum Tintenstrahl- und Laserdruck haben gezeigt, dass die einzelnen Bildpunkte (Pixel) aus einem Raster bestehen, das – dem Grauwert entsprechend – mit Druckerpunkten (dots) aufgefüllt wird. Dabei streuen die Tintenstrahldrucker die einzelnen Druckerpunkte innerhalb der Matrix des Bildpunktes, was den Tonwertverlauf sehr verbessert. Die Ausführungen haben auch ergeben, dass für den Druck eines Bildes mit der Qualität eines Kunstdrucks beim Offsetdruck mindestens 150 Bildpunkte/inch bzw. 6 - 7 Bildpunkte/mm erforderlich sind. Nun ergibt sich die Frage, mit welcher Auflösung ein Bild gescannt werden muss.

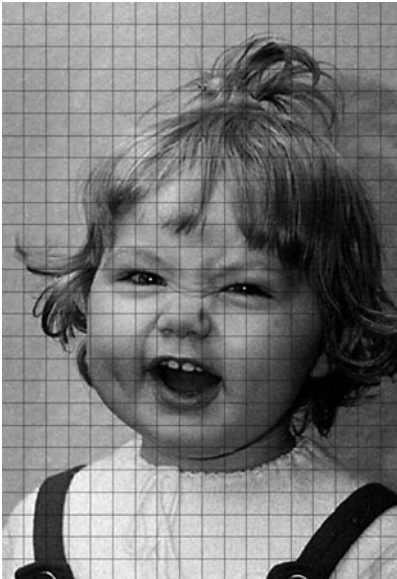


Abb. 2.1: Aufteilung eines Bildes in Bildpunkte (Pixel)

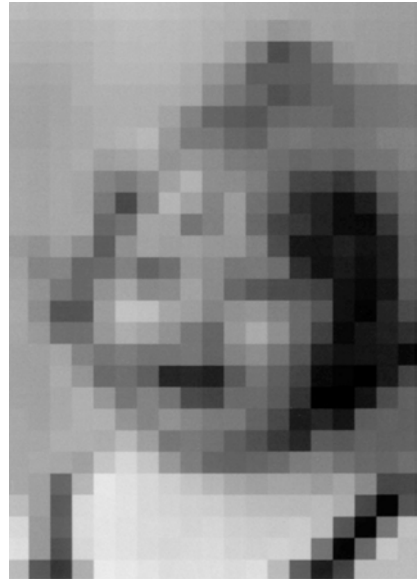


Abb. 2.2: Mittelung der Pixel-Helligkeit

Vor der Beantwortung dieser Frage sollen hier einige grundsätzliche Probleme bei der Digitalisierung von Bildern behandelt werden. Diese verläuft in der Regel so, dass ein rechteckiges *Raster* über das Bild gelegt wird (Abbildung 2.1). Jedes Feld des Rasters entspricht einem *Pixel*. Jedem einzelnen Pixel wird durch den Scanner oder die Kamera ein Helligkeits- oder Farbwert zugeordnet. Dieser entspricht dem über das Feld gemittelten Hel-

ligkeits- oder Farbwert des Bildes (Abbildung 2.2). Die Bildpunkte werden nacheinander in Zahlenwerte umgeformt (digitalisiert) und gespeichert

Bei Scannern wird die Vorlage durch einen Schlitten abgefahren und dabei zeilenweise über eine Optik auf der Sensorzeile abgebildet (Abbildung 2.3). Diese besteht aus mehreren tausend winziger lichtempfindlicher Zellen. In jeder Zelle (entsprechend einem Pixel) entsteht proportional zur Beleuchtungsstärke eine elektrische Ladung. Diese Ladungen werden parallel in ein *Schieberegister* übertragen, nacheinander seriell ausgelesen und anschließend durch einen Verstärker in einzelne den Ladungswerten proportionale elektrische Spannungswerte umgewandelt.

Anschaulich dargestellt: Der Scanner scheidet das Bild zuerst in Streifen und diese dann in kleine Quadrate oder Rechtecke. Jede lichtempfindliche Zelle in Abbildung 2.3 liefert also einen einzelnen Bildpunkt bzw. ein der Beleuchtungsstärke proportionales elektrisches Signal an den *Analog/Digital-Umformer* (A/D-U).

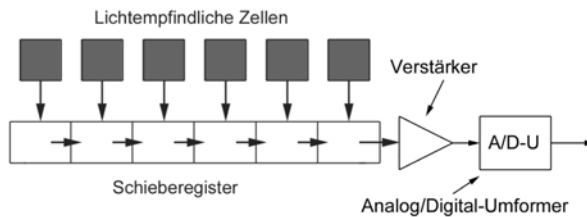


Abb. 2.3: CCD-Zeile eines Scanners

Bei der anschließenden A/D-Umformung werden die einzelnen elektrischen Spannungswerte in Zahlenwerte umgesetzt. Die dezimalen Zahlenwerte liegen zwischen 0 (schwarz) und 255 (maximale Helligkeit). Für die Darstellung wird allerdings nicht das gewohnte Dezimalsystem, sondern das duale Zahlensystem verwendet, das nur die Ziffern 0 und 1 benutzt. Das Prinzip der Digitalisierung wird in Kapitel 4 behandelt.

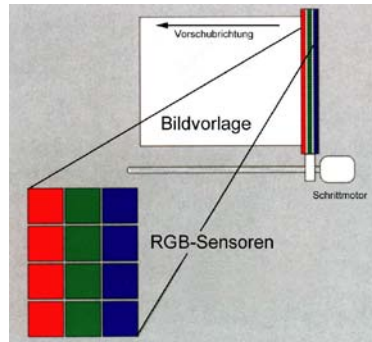


Abb. 2.4: Trilineare CCD-Sensorzeile

Die einzelnen lichtempfindlichen Zellen sind farbenblind. Für die Wahrnehmung von Farben werden die lichtempfindlichen Zellen mit roten, grünen und blauen Filtern (RGB-Sensoren) versehen. Üblicherweise verwendet man dreifache Zeilen nach Abbildung 2.4, die sehr eng benachbart sind.

2.2 Wie viel Auflösung ist erforderlich?

In der Praxis ergibt sich die Frage, in wie viele Abtastintervalle ein Bild unterteilt werden muss, um eine möglichst genaue Wiedergabe der Bilddetails zu erhalten. Es ist einleuchtend, dass die Anzahl der Abtastpunkte um so größer sein muss, je feiner das Bild strukturiert ist. Das *Abtasttheorem von Nyquist und Shannon* beschreibt die mathematische Rekonstruierbarkeit einer periodischen Struktur aus einer Folge von Abtastwerten. Daraus geht hervor, dass die Abtastung mindestens doppelt so groß sein muss, wie das Intervall der feinsten Bilddetails.

Bei der Digitalisierung von Bildern, welche bei der Druckausgabe gerastert werden, muss die Abtastrate (= Auflösung, ausgedrückt in ppi) beim Scannen mindestens doppelt so groß sein wie die Druck-Rasterweite (ausgedrückt in ppi)

Wird mit einer höheren Auflösung gescannt, fallen mehr Daten an, als beim Druck ausgenutzt werden können. Bei einer Verdopplung der Abtast-rate vervierfacht sich die Datenmenge.

Umgekehrt ergibt sich für ein vorgegebenes Druckraster die erforderliche Scanauflösung:

$$\text{Erforderliche Scanauflösung} = 2 \times \text{Druckraster (in ppi)} \times \text{Maßstabsfaktor}$$

Der Faktor 2 wird im drucktechnischen Gewerbe auch als *Qualitätsfaktor* (QF) oder *Rasterfaktor* bezeichnet. Für geringere Anforderungen an die Bildqualität oder für Rasterweiten über 133 lpi (Offsetdruck) werden auch Werte $QF < 1,5$ vorgeschlagen. Dabei können jedoch die später beschriebenen Effekte der *Unterabtastung* auftreten. Für die Abtastung von Grafiken (Strichzeichnungen) sollte der Qualitätsfaktor deutlich über 2 liegen.

Beispiel 2.1:

Eine Druckvorlage soll mit einem Flachbettscanner eingescannt und im gleicher Größe (Maßstabsfaktor = 1) mit 150 ppi gedruckt werden.

$$\text{Erforderliche Scanauflösung} = 2 \times 150 \text{ ppi} \times 1 = 300 \text{ ppi}$$

Dieser Wert wird auch von sehr einfachen Geräten erreicht.

Beispiel 2.2:

Ein Ausschnitt (2,2cm x 3,4cm) eines KB-Negativs soll gescannt und auf DIN A4 (20cm x 30cm) mit 150 ppi gedruckt werden.

$$\begin{aligned} \text{Maßstabsfaktor der Vergrößerung} &= 20\text{cm} : 2,2\text{cm} \approx 9 \\ \text{Erforderliche Scanauflösung} &= 2 \times 150 \text{ ppi} \times 9 = 2.700 \text{ ppi} \end{aligned}$$

Dieses ist die typische Auflösung guter KB-Film- und Dia-Scanner. Im professionellen Bereich werden Scanauflösungen bis 4.000 ppi verwendet.

Beispiel 2.3:

Das KB-Negativ aus Beispiel 2.2 soll auf 27cm x 40 cm (etwa DIN A3) ausgedruckt werden, dieses entspricht einem

$$\text{Maßstabsfaktor} = 27 \text{ cm} : 2,2 \text{ cm} \approx 12,3$$

Bei einer Scanauflösung von 2.700 ppi kann mit einem

$$\begin{aligned} \text{Druckraster} &= \text{Scanauflösung} : (2 \times \text{Maßstabsfaktor}) = \\ &2.700 \text{ ppi} : (2 \times 12,3) \approx 110 \text{ ppi} \end{aligned}$$

gedruckt werden.

Dieser Wert liegt unter den empfohlenen 150 ppi. Die Praxis hat aber gezeigt, dass sich auch bei dieser Auflösung noch eine recht gute Bildqualität ergeben kann.

2.3 Auswirkung der Unterabtastung (Aliasing)

Ob mit der oben angegebenen erforderlichen Scan-Auflösung für ein bestimmtes Druckraster auch alle feinen Details der Bildvorlage erfasst werden können, ist eine andere Frage, die im Folgenden untersucht werden soll.

Abbildung 2.5 zeigt ein Testbild, bei dem die Dichte kontinuierlich von 0,5 Linienpaaren/mm bis auf 2,5 Linienpaare/mm ansteigt. Im Rahmen der drucktechnischen Möglichkeiten ist dieses noch zu erkennen. Es stellt sich die Frage, mit welcher Mindestauflösung gescannt werden muss, um alle Linienpaare zu erfassen.

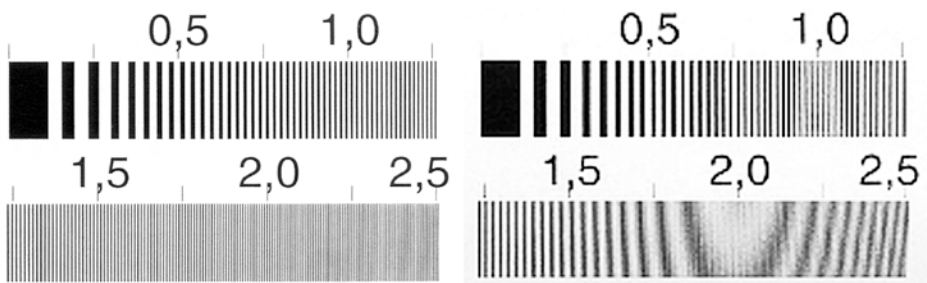


Abb.: 2.5: Links: Abtastung mit 1.200 ppi. Rechts: Abtastung mit 50 ppi (2 Pixel / mm)

Das linke Bild wurde mit 1.200 ppi bzw. ≈ 470 Pixel/mm gescannt. Im Rahmen der drucktechnischen Möglichkeiten zeigt sich, dass alle Linienpaare getrennt wiedergegeben werden.

In Abbildung 2.5 (rechts) wurde die Abtastrate beim Scannen auf 50 ppi bzw. ≈ 2 Pixel/mm herabgesetzt. Man erkennt, dass schon bei 1 Linienpaar/mm die Struktur nicht mehr genau wiedergegeben wird; hier beginnt bereits der Bereich der *Unterabtastung* (engl. *Aliasing*). Unterabtastung bedeutet, dass das *Nyquist-Shannon-Kriterium* nicht beachtet wurde.

Ab 1,5 Linienpaaren/mm erscheint ein gröberes Linienraster, das nicht mehr mit dem Original übereinstimmt (*Pseudostrukturen*). Ab 2 pixel/mm entstehen Moiré-Erscheinungen (sich wiederholende Störmuster). Wenn regelmäßige Strukturen richtig wiedergegeben werden sollen, muss also die Abtastrate beim Scannen mindestens dem Doppelten der höchsten im Bild vorkommenden *Frequenz* (Linienpaare pro mm bzw. inch) entsprechen. Im obigen Beispiel wären dieses

| |
|--|
| $2,5 \text{ Linienpaare/mm} \times 2 \Rightarrow 5 \text{ pixel/mm} = 50 \text{ pixel/cm} \approx 125 \text{ ppi}$ |
|--|

Um alle Feinheiten regelmäßiger Bildstrukturen originalgetreu wiederzugeben, muss also die *Frequenz der Bildstrukturen* bekannt sein. Diese Betrachtungen gelten auch für die Digitalkameras.

2.4 Der Dichteumfang

Ein weiteres Kriterium für die Auswahl eines Scanners ist der erreichbare Dichteumfang; dieses ist ein logarithmischer Wert, der angibt wie hell und dunkel Bildpunkte sein können, damit sie noch vom Scanner erfasst werden können. Dabei entspricht:

| | |
|-----------|-------------------------------|
| Dichte 1: | Helligkeitsverhältnis 1:10 |
| Dichte 2: | Helligkeitsverhältnis 1:100 |
| Dichte 3: | Helligkeitsverhältnis 1:1.000 |

Aufsichtsvorlagen haben eine Dichte bis etwa 2,2, entsprechend einem Helligkeitsverhältnis von 1:160. Farbnegativfilme besitzen Maximaldichten von etwa 3,3 (Helligkeitsverhältnis ca. 1:2.000) und einige Diafilme bis

etwa 4,0 (Helligkeitsverhältnis 1:10.000).

Die Problematik des Dichteumfangs von Digitalkameras (Dynamikumfang) und die damit verbundene Belichtungsproblematik wird zum Beispiel unter ¹⁰⁾ behandelt.

10 <http://digicam-experts.de/wissen/16>

3. Digitalkameras

Die von einer Digitalkamera gelieferte Bildqualität ist abhängig von einer Reihe von Komponenten, die in Abbildung 3.1 dargestellt sind. Jedes Glied dieser Übertragungskette beeinflusst die Bildqualität in positiver oder negativer Weise. Insbesondere gilt dieses für das Objektiv¹¹, das am Anfang dieser Kette steht.

Während beim Scannen die Abtastung der einzelnen Bildpunkte zeilenweise erfolgt, bildet das Objektiv der Digitalkamera alle Pixel gleichzeitig auf einen Bildwandler (Sensormatrix) ab (Abbildungen 3.1¹² und 3.2). Nach der Belichtung werden alle der Bildpunkthelligkeit proportionalen elektrischen Ladungen aus den Sensoren gleichzeitig in die zugehörigen vertikalen Schieberegister umgeladen, diese dann nacheinander in das horizontale Schieberegister verschoben und seriell an den Verstärker weitergegeben. Dieser wandelt die elektrischen Ladungen in Spannungswerte um. Anschließend erfolgt die Digitalisierung.

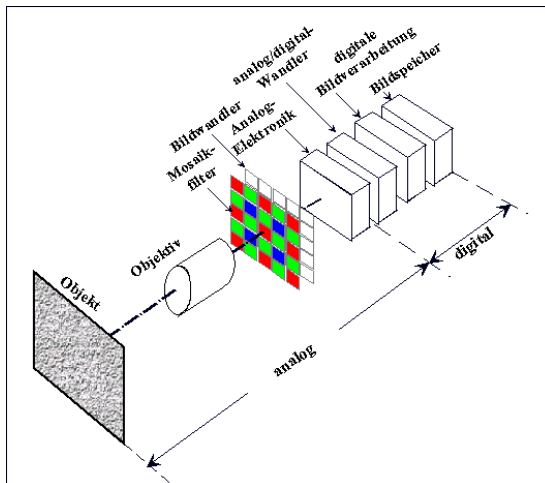


Abb.: 3.1: Prinzipieller Aufbau einer Digitalkamera

11 http://www.schneiderkreuznach.com/fileadmin/user_upload/bu_photo_imaging/Foto-Objektive/know_how/Die_Bildqualitaet_von_Objektiven_fuer_die_digitale_Fotografie.pdf

12 Quelle: Schneider Kreuznach

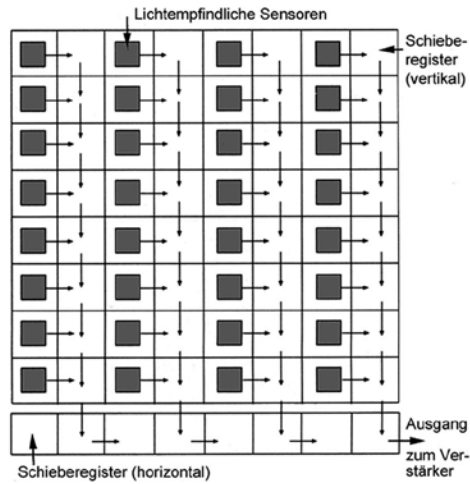
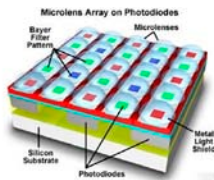


Abb.: 3.2: Sensormatrix einer Digitalkamera



CCD-Sensoren mit Mikro-Linsen und Bayer-Filter

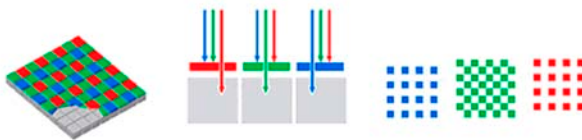


Abb.: 3.3: Bayer-Filter

Auch bei der Sensormatrix sind die einzelnen Sensoren farbenblind. Während beim Scannen zur Erzeugung der Farbinformation üblicherweise trilineare Zeilen verwendet werden, haben die einzelnen Pixel der Matrizen Mosaik-Farbfiler nach Abbildung 3.3 (*Bayer-Filter*).

Die grünen Pixel kommen doppelt so oft vor wie die roten und blauen. Dadurch erhält die Sensormatrix eine Farbenempfindlichkeit, die etwa der

des menschlichen Auges entspricht. Jeder zweite Pixel liefert einen grünen Farbauszug und jeder vierte einen roten bzw. blauen. Trotzdem liefern Matrix-Sensoren für jeden Pixel die drei Farbinformationen Rot, Grün und Blau. Die fehlenden Informationen werden aus den Nachbarpixeln durch *Interpolation* berechnet.

Die Sensorchips wurden zu Beginn überwiegend in *CCD-Technologie* gefertigt. Das Problem lag dabei im Preis und im hohen Stromverbrauch. Neben dem Kamera-Monitor ist der Bildsensor der größte Stromverbraucher.

CMOS-Bildsensoren sind günstiger in der Fertigung und verbrauchen weniger Strom als CCD-Sensoren. Ein Nachteil ist jedoch die geringere Lichtempfindlichkeit. Hier schafft eine neuartige Sensorbauform namens BSI (Backside Illumination) Abhilfe. Ein BSI-Sensor wird umgekehrt in eine Digitalkamera eingebaut, mit der Elektronik auf der Rückseite. Dadurch kann das Licht ungehindert durch Leiterbahnen auf die Fotodioden treffen. Die Sensoren sind dadurch deutlich lichtempfindlicher und produzieren weniger Bildrauschen¹³. Eine vergleichende Betrachtung CCD-CMOS enthält¹⁴).

Die einzelnen Pixel sollten eine Seitenlänge $> 3\mu\text{m}$ besitzen, damit das durch den Sensor verursachte *Rauschen*¹⁵ gering bleibt. Rauschen entsteht durch Ladungsträger, die in den lichtempfindlichen Sensoren durch Temperatureinflüsse freigesetzt werden. Diese erzeugen auch ohne Lichteinfall ein Bildsignal, das sich mit dem groben Korn konventioneller hochempfindlicher Filme vergleichen lässt.

3.1 Zusammenhang zwischen Auflösung und Bildformaten

Aus Marketing-Gründen bauen die Kamerahersteller immer mehr *Megapixel* in ihre Kameras. Viele Käufer glauben noch immer, dass eine Kamera umso besser ist, je mehr Pixel sie hat. Ende der 1990er Jahre stimmte das auch. Doch die Zeit ist lange vorbei. Die Begründung wird auf der bereits zitierten Website <http://6mpixel.org/> geliefert.

13 Quelle: <http://www.pcwelt.de/ratgeber/CMOS-vs-CCD-Bildsensoren-5794727.html> ,

14 http://www.drgoehring.de/uni/papers/CCD-CMOS_08122002.pdf

15 <http://de.wikipedia.org/wiki/Bildrauschen>

Untersuchen wir das Beispiel einer Digitalkamera mit einem Sensor mit 6 Megapixeln, der in 3.000 horizontale und 2.000 vertikale Pixel aufgeteilt sind. Bei der Frage nach dem maximal möglichen Format des gedruckten Bildes gelten die Überlegungen in Kapitel 2. Für den Druck müssen wieder mindestens doppelt so viele Bildpunkte von der Kamera geliefert werden, wie es dem Druckraster entspricht. Daraus ergibt sich die

$$\text{Seitenlänge des Drucks in cm} = \frac{\text{Anzahl der Pixel der Sensormatrix}}{2 \times \text{Rasterweite beim Druck}}$$

Beispiel 3.1:

$$3.000 \text{ Pixel} : (2 \times 60 \text{ Pixel/cm}) = 25 \text{ cm Seitenlänge}$$

Beispiel 3.2:

Wird bei etwas geringeren Anforderungen an die Bildqualität ein Qualitätsfaktor $QF = 1,5$ zugelassen, erhöht sich der Wert auf

$$3.000 \text{ Pixel} : (1,5 \times 60 \text{ Pixel/cm}) = 33,3 \text{ cm}$$

Die berechneten Zahlen in Tabelle 3.1 stimmen gut mit den in der Praxis erreichten Werten überein. Der linke Wert in der Spalte *Druckformat* wurde mit $QF = 2$, der rechte Wert mit $QF = 1,5$ ermittelt. Die Werte gelten sowohl für die Ausbelichtung auf Fotopapier als auch für den Druck mit Tintenstrahldruckern.

| Sensor-Auflösung | Druckformat |
|-------------------|---------------------------|
| 3 Mio. Pixel | 13cm x 18cm → 18cm x 24cm |
| 6 Mio. Pixel | 18cm x 24cm → 24cm x 36cm |
| 12 Mio. Pixel | 24cm x 36cm → 30cm x 45cm |
| Scanner 2.700 ppi | 20cm x 30cm → 30cm x 40cm |

Tabelle 3.1: Ausgabegrößen von Digitalfotos

3.2 Speicherformate

Beim Scannen und in der digitalen Fotografie fallen große Datenmengen an, die für die weitere Bearbeitung gespeichert werden müssen. Dabei genügt es nicht, die Helligkeits- oder Farbwerte einfach nacheinander im Speicher abzulegen. Die Daten einer Bilddatei werden in einer bestimmten Struktur (*Dateiformat*) angelegt. Weit verbreitete Dateiformate sind *TIFF*, *JPEG*, *RAW*, *BMP* oder *EPS*.

Das *TIFF-Format*¹⁶ erlaubt universelles Speichern, den Austausch zwischen verschiedenen Programmen zur Bildbearbeitung, Austausch zwischen verschiedenen Rechnerwelten (z.B. Mac und PC) sowie verlustfreie Komprimierung der Daten.

*JPEG*¹⁷ bietet eine hochwirksame Komprimierung der Daten bei kalkulierbarem Detailverlust (Tabelle 6.2).

Das *BMP-Format*¹⁸ (Bitmap) ist nur bei den Betriebssystemen MS-DOS/Windows auf IBM-kompatiblen Computern üblich. System-Bilder für Windows und für manche Multimedia-Programme müssen als BMPs gespeichert sein. Das Format *EPS*¹⁹ ist unerlässlich für die professionelle Druckvorstufe. Internet-Gestalter benötigen *JPEG*, *GIF*²⁰ und evtl. *PNG*²¹.

Beim *Rohdatenformat RAW*²² (englisch raw = roh) werden die Daten der Kamera nach der Digitalisierung weitgehend ohne Bearbeitung auf das Speichermedium geschrieben. Diese Rohdaten werden auch als *digitales Negativ* bezeichnet.

Für die Speicherung in der Kamera werden die Formate *RAW* und vor allem *JPEG* verwendet. Details werden in Kapitel 6.2 behandelt.

16 http://de.wikipedia.org/wiki/Tagged_Image_File_Format

17 <http://de.wikipedia.org/wiki/JPEG>

18 http://de.wikipedia.org/wiki/Windows_Bitmap

19 http://de.wikipedia.org/wiki/Encapsulated_PostScript

20 http://de.wikipedia.org/wiki/Graphics_Interchange_Format

21 http://de.wikipedia.org/wiki/Portable_Network_Graphics

22 http://de.wikipedia.org/wiki/Rohdatenformat_%28Fotografie%29

4. Die Digitalisierung

In den Kapiteln 2 und 3 wurde beschrieben, wie die lichtempfindlichen Sensoren der Scannerzeile bzw. der Kamera-Matrix das Bild zunächst in einzelne Bildpunkte zerlegen. Dabei wird die Helligkeit jedes Pixels gemittelt. In den Sensorzellen entsteht eine zur Helligkeit proportionale elektrische Ladung, die anschließend in elektrische Spannungswerte umgesetzt wird. Anschließend erfolgt die Digitalisierung der einzelnen Helligkeitswerte.

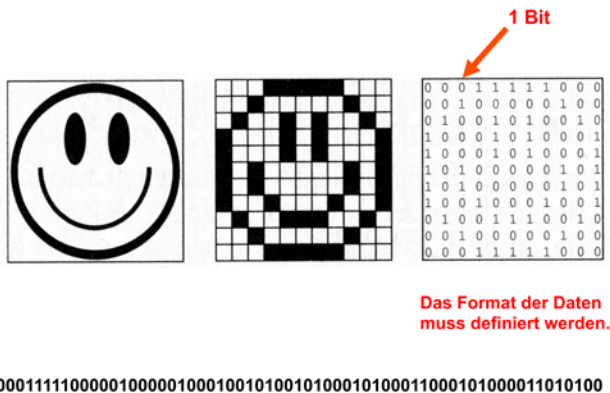


Abb.: 4.1: Digitalisierung einer Strichzeichnung

Digitalisierung bedeutet Umwandlung der einzelnen Spannungswerte in Zahlen. Computer verwenden dafür das *duale*²³ (*binäre*) Zahlensystem, das nur die Werte „0“ und „1“ verwendet. Diesen entsprechen in der elektrischen Darstellung z.B. die Zustände *keine Spannung* oder *Spannung vorhanden*, die durch einfache Schalter (Transistoren) realisiert werden können. Die binäre Form der Darstellung physikalischer Größen ist für eine Verarbeitung und Speicherung besser geeignet, als die leicht durch Störungen verfälschbaren analogen²⁴ Daten.

Bei der Digitalisierung von Bildern wird im Prinzip ein rechteckiges Raster über das Bild gelegt. Jedes Feld des Rasters entspricht einem Bild-

23 Das Dualsystem, auch Zweiersystem oder Binärsystem genannt, ist ein Zahlensystem, das zur Darstellung von Zahlen nur zwei verschiedene Ziffern benutzt.

24 Ein analoges Signal besitzt einen stufenlosen und unterbrechungsfreien Verlauf.

punkt (engl. *pixel* = picture element). Jedem einzelnen Pixel wird durch die Kamera oder den Scanner ein Helligkeitswert zugeordnet. Bei Strichzeichnungen wird der Bildpunkt auf Schwarz gesetzt, wenn mindestens 50% der Pixelfläche geschwärzt sind. Die Bildpunkte werden nacheinander in Zahlenwerte umgeformt (digitalisiert) und gespeichert. In Abbildung 4.1 wurde (beispielsweise) einem schwarzen Bildpunkt der Wert „1“ zugeordnet, einem weißen eine „0“.

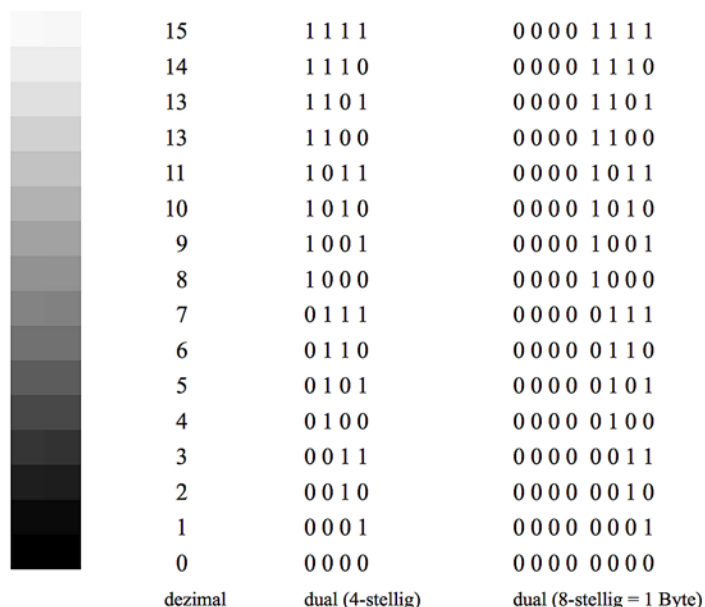


Abb.: 4.2: Digitalisierung eines Graukeils

Sind mehr als zwei Helligkeitswerte vorhanden, muss die Stellenzahl der Dualzahl erweitert werden. Zur Abbildung eines *Graukeils* (Abbildung 4.2) ist dieser in einzelne Stufen zu unterteilen. Dabei ergibt sich die Frage, wie viele Stufen für eine gute Annäherung an das Original erforderlich sind.

In diesem Beispiel wurde der Graukeil in 16 Stufen unterteilt, was offensichtlich zu wenig für einen kontinuierlichen Übergang der Helligkeit von schwarz nach weiß ist. Die Stufen erhalten die Nummern von 0 bis 15.

Abbildung 4.2 zeigt rechts die entsprechende duale Darstellung. Das *Bildungsgesetz* der Dualzahlen ist sehr einfach.

Im Dezimalsystem liegt der Wertebereich der Ziffern einer Stelle zwischen 0 und 9. Addiert man zur höchsten Ziffer (9) eine 1, so ergibt sich wieder 0 und ein Übertrag in die nächst höhere Stelle:

$$9 + 1 = 0, \text{ Übertrag } 1$$

Bei den Dualzahlen gibt es nur die Ziffern 0 und 1. Auch hier gilt: Addiert man zur höchsten Ziffer 1 eine 1, so ergibt sich wieder 0 und ein Übertrag in die nächsthöhere Stelle:

$$1 + 1 = 0, \text{ Übertrag } 1$$

Computer arbeiten mit einer 8-stelligen Dualzahl als Basiseinheit, die *Byte* genannt wird. Der Wertebereich einer 8-stelligen Dualzahl liegt zwischen 0000 0000 und 1111 1111. Dieses sind insgesamt 256 verschiedene Werte, die den Dezimalzahlen 0 bis 255 entsprechen. Computer können also in einem Byte 256 verschiedene Helligkeits- bzw. Grauwerte speichern.



Abb.: 4.3: Tonwertabrisse bei einer 4-Bit-Darstellung

Für eine gute Grauwertdifferenzierung sollten mindestens 100 bis 150 unterschiedliche Graustufen vorhanden sein. Der Computer bietet 256 verschiedene Werte zur Speicherung und Verarbeitung an.

Werden beispielsweise nur 4 Bit entsprechend 16 Graustufen wie in Abbildung 4.2 verwendet, ergeben sich *Tonwertabrisse* nach Abbildung 4.3.

Was im obigen Beispiel bei der Digitalisierung von Grauwerten beschrieben wurde, gilt auch für die Grundfarben Rot, Grün und Blau. Für jede Grundfarbe wird ein Byte verwendet, so dass für einen Bildpunkt

$$3 \text{ Byte} = 3 \times 8 \text{ Bit} = 24 \text{ Bit}$$

gespeichert werden. Damit lassen sich

$$256 \times 256 \times 256 \approx 16,8 \text{ Mio.}$$

verschiedene Farben darstellen. Da vom Menschen nur etwa 380.000 unterschiedliche Farben wahrgenommen werden können, würde eine Speicherung mit 8 Bit pro Farbe grundsätzlich ausreichen.

Durch häufiges Verändern der Bilddaten durch *Bildverarbeitungsprogramme* treten allerdings immer wieder Rundungsfehler auf; daher ist es empfehlenswert, beim Scannen und bei der Veränderung der Bilddaten bei der Bildverarbeitung zunächst mit $3 \times 16 \text{ Bit} = 48 \text{ Bit}$ zu arbeiten und diese anschließend vor dem Speichern wieder auf $3 \times 8 \text{ Bit} = 24 \text{ Bit}$ zu reduzieren (wenn der Scanner und das Programm dieses zulassen).

„Das Problem der Farbe und des Farbensehens ist noch immer schlecht verstanden - selbst unter Künstlern, Physikern und Biologen“.

David. H. Hubel, der 1981 den Nobelpreis für seine Forschungen auf dem Gebiet des Farbensehens erhielt.

5. Grundbegriffe des Farbmanagements

Bildbearbeitung und Grafikerstellung am Computer sind relativ einfach geworden, seit es entsprechende Computerprogramme gibt. In vielen Fällen erhält man schnell ein Ergebnis, das oft jedoch nicht befriedigt. Die Programme bieten tolle Effekte und unglaubliche Filter; man wird überwältigt von den vielen Möglichkeiten. In der Praxis werden diese Eigenschaften aber selten benutzt. Häufig möchte man eine Bildvorlage (Negativ oder Positiv) in den *Kontrasten* verbessern, *Farbstiche* entfernen oder *farb-richtig* drucken. Dazu bedarf es - neben der Kenntnis der entsprechenden Softwareprogramme - auch eines Grundwissens über Farben, Farbmodelle und des Farbmanagements.

Diese Darstellung wendet sich an Einsteiger, die ihre Bilder mit Tintenstr- oder Laserdruckern selbst ausdrucken möchten. Dazu sollten sie ausschließlich im *RGB-Modus* arbeiten, der die volle Bandbreite aller Werkzeuge des Bildbearbeitungsprogramms zur Verfügung stellt. Die Umwandlung in den *CMYK-Modus* erledigt im nicht-professionellen Bereich die Druckersoftware.

Wenn die Bilddaten an eine Druckerei abgegeben werden, sollte man den dortigen Profis die Umwandlung in den *CMYK-Modus* (*Farbseparation*) überlassen. Alle *CMYK-Voreinstellungen* des Bildverarbeitungsprogramms sollten nur dann verändert werden, wenn für die Druckvorstufe gearbeitet wird.

Einige wichtige Zusammenhänge des Farbmanagements sollen hier kurz dargestellt werden. Nicht behandelt werden die Möglichkeiten der unterschiedlichen Programme zur Bildbearbeitung.

5.1 Was ist Farbe?

Unter dem Begriff *Farbe* kann sich jeder intuitiv etwas vorstellen, aber eine allgemein gültige Definition vermag kaum jemand zu geben. Farbe ist ein komplexes Phänomen, bei dem neben rein physikalischen Faktoren auch neuro-physiologische und psychologische eine Rolle spielen. Die Sinnesempfindung *Farbe* entsteht, wenn der Sehapparat elektromagnetische Strahlen aufnimmt und das Gehirn entsprechende Informationen zu einer Wahrnehmung verarbeitet. Die Übertragung vom Auge zum Gehirn erfolgt durch frequenzcodierte biologische Ströme. Erst im Gehirn entsteht der Eindruck *Farbe* (Abbildung 5.1). Farbe ist das Wahrgenommene, so wie der mechanische Reiz durch Druck oder Rauheit hervorgerufen wird.

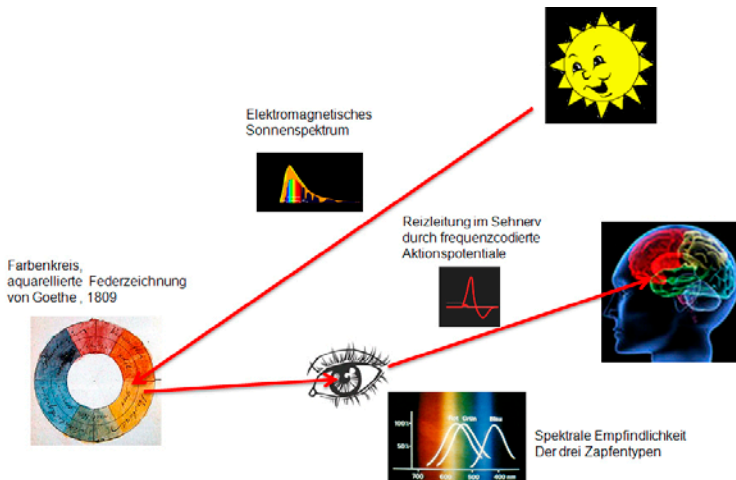


Abb.: 5.1: Farbe ist das was wir sehen und empfinden

Isaac Newton (1642 - 1726) entdeckte um 1665, dass Licht aus sieben verschiedenen Farbanteilen (rot, orange, gelb grün, blau, indigo, violett) zusammengesetzt ist. Allerdings ging Newton von einem physikalischen Modell aus, welches Licht als Partikel beschreibt. Er hat durch seinen Einfluss sehr lange verhindert, dass auch das Wellenmodell, wie es z.B. von Thomas Young oder Cristian Huygens (1629 - 1695) vertreten wurde, anerkannt wurde.

Goethe (1749 - 1832) lehnte Newtons Ansatz ab. Er war der Ansicht, dass dieser Unrecht habe, dass Farben nicht durch Teilung des weißen

Lichtes sondern nur durch Zusammenwirken von Licht und Finsternis entstehen. Dieser Disput beruhte auf den unterschiedlichen Annahmen beider. Während Newton die *additive* Farbsynthese von *Licht* untersuchte, beschäftigte Goethe sich mit der *subtraktiven* Farbsynthese der *Farbmittel*. Das Problem der Entstehung von Weiß stellte für Goethe den Schlüssel zum Verständnis der Farben dar („...man erdenke sich Versuche, von welcher Art man wolle, so wird man niemals imstande sein, aus farbigen Pigmenten ein weißes Pigment zusammenzusetzen, das neben oder auf vollkommen reinem Schnee oder Pulver nicht grau oder bräunlich ne“)²⁵.

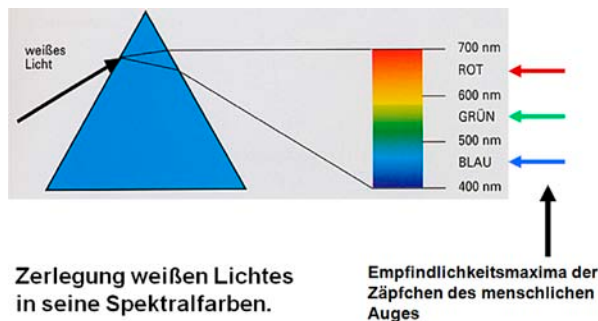


Abb. 5.2: Spektralfarben des weißen Lichts

Der englische Forscher Thomas Young (1773 bis 1829) vermutete, das menschliche Auge enthalte drei verschiedene *Seh-Elemente*, die das rote, blaue und grüne Licht verarbeiten und daraus das farbige Bild der Welt aufbauen. Grau und Weiß werden wahrgenommen, wenn alle drei Rezeptortypen gleich stark angeregt werden. Schwarz wird wahrgenommen, wenn kein Rezeptor stimuliert wird. Der deutsche Physiker und Physiologe Hermann Helmholtz (1821 - 1894) griff die Ansicht auf und verwandte sie als Fundament für seine *Dreifarbentheorie des Sehens*, die im Wesentlichen bis heute gültig blieb. Helmholtz hatte beobachtet, dass man aus farbigem Licht dreier Primärfarben jede beliebige andere Farbe mischen kann. Dies ist auch heute noch das Funktionsprinzip aller Farbfernsehbildschirme und Farbmonitore.

25 Goethes Farbenlehre: http://de.wikipedia.org/wiki/Zur_Farbenlehre

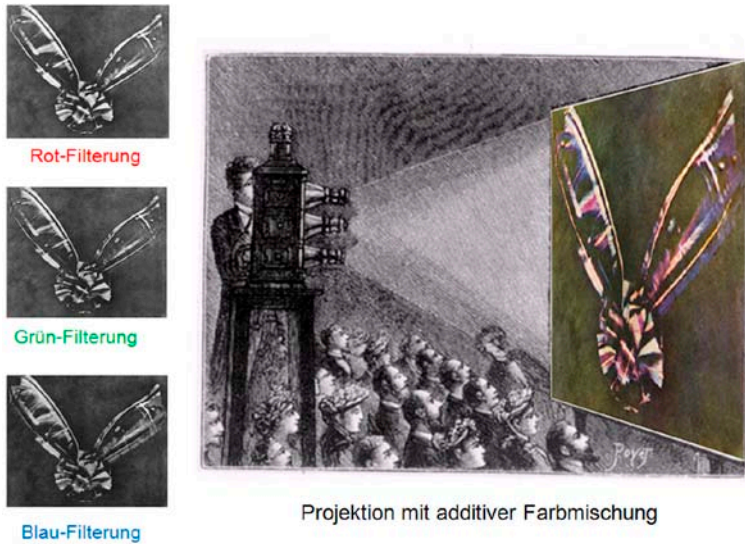


Abb. 5.3: Maxwells Demonstration

Auf der Grundlage des *Dreifarbensehens* gelang es dem englischen Physiker James Clerk Maxwell schon im Jahre 1855, das erste Farbfoto der Welt zu erzeugen. Die Vorführung der additiven Farbmischung basierte auf drei Schwarzweiß-Diapositiven, die durch drei Farbfilter (Rot, Grün und Blau) fotografiert worden waren und durch entsprechende Filter deckungsgleich projiziert wurden. Damit war der Beweis für die Theorie der additiven Farbmischung erbracht (Abbildung 5.3).

Hier sei angemerkt, dass das Prinzip der Aufnahme farbiger Motive auf drei Schwarzweißfilmen heute für die Archivierung farbiger Kinofilme eingesetzt wird, da sich digitale Archivsysteme bislang als störanfällig und auf Dauer als sehr pflege- und damit kostenintensiv erweisen. Besonders langlebig und daher für wertvolle Projekte geeignet ist die Archivierung auf einem *Separation Master*. Hier werden die drei Farbkanaäle Rot, Grün und Blau einzeln auf Schwarzweißfilm aufgebracht, der mehrere hundert Jahre gelagert werden kann. Mit diesem hochwertigen Material können zu jedem späteren Zeitpunkt alle Auswertungsformate bedient werden.

5.2 Probleme des Farbmanagements

Sowohl in der analogen als auch in der digitalen Farbfotografie haben wir es mit verschiedenen *Farbräumen* zu tun. Ein Farbraum beschreibt die Menge der darstellbaren Farben eines Mediums oder Gerätes – dafür hat sich auch die englische Bezeichnung (*color*) *gamut* eingebürgert. Ein Farbraum enthält nicht unbedingt alle wahrnehmbaren Farben. Die Farbräume können sich auf die verwendete Hardware beziehen oder benutzerorientiert sein. Bedingt durch den rasanten Fortschritt in der elektronischen Bildverarbeitung werden viele Begriffe nicht einheitlich verwendet und der Leser hat oftmals Orientierungsprobleme.

In der analogen Farbfotografie überlassen wir es der Fotochemie, die Farben mehr oder weniger natürlich wiederzugeben. Wegen der Komplexiertheit der fotochemischen Verfahren haben wir nur wenige Möglichkeiten, sie selbst auszuführen.

Die Schichten unserer Farbfilme sind für die drei *additiven Grundfarben* Rot, Grün und Blau empfindlich (RGB-Farbraum). Bei der Entwicklung entstehen die dazu *komplementären Grundfarben* Cyan (Blaugrün), Magenta (Purpur = Blaurot) und Yellow (Gelb) – aus diesen baut das Farbbild oder Farbdia mittels subtraktiver Farbmischung das Bild auf (CMY-Farbraum). Daraus wird für den Vierfarbendruck der um Schwarz erweiterte Modus CMYK generiert.

Nach dem Scannen des Bildes erfolgt die interne Bearbeitung im Bildbearbeitungsprogramm im standardisierten und geräteunabhängigen CIE-Lab-Farbraum, wovon der Benutzer aber nicht unbedingt etwas bemerkt. Da die verschiedenen Farbräume unterschiedlich groß sind, führen die erforderlichen Umwandlungen von einem Farbraum in einen anderen dazu, dass Farbabweichungen auftreten können.

In der digitalen Fotografie können wir alle Prozess-Schritte von der Aufnahme oder dem Scan bis zum gedruckten Bild selbst erledigen und dabei in jeder Stufe optimierend eingreifen. Vor der Einführung des Desktop Publishing (DTP) waren die Systeme der Elektronischen Bildverarbeitung (EBV) geschlossen und die einzelnen Komponenten (Scanner, Monitor, Drucker, Belichter) konnten daher noch relativ einfach aufeinander abgestimmt werden. Bei offenen DTP-Systemen ist dieses nicht mehr so einfach, da eine Vielzahl unterschiedlicher Geräte von verschiedenen Herstellern eingesetzt wird, die alle aufeinander abgestimmt werden müssten.

In technischen Geräten treten bei der Umsetzung einer physikalischen Größe in eine andere immer Fehler auf – zum Beispiel weichen beim Scannen eines Bildes die in der Bilddatei gespeicherten Farben etwas von den Farben der Vorlage ab. Werden diese Farben auf dem Bildschirm des Computers angezeigt, entstehen aufgrund der Eigenschaften der Leuchtphosphore weitere Farbabweichungen. Die Farben des Monitors (und die gescannten Farben) stimmen wiederum nicht genau mit den durch den Drucker erzeugten Farben überein. Man erhält sogar in den meisten Fällen unterschiedliche Ergebnisse, wenn die gleiche Datei auf zwei unterschiedlichen Geräten ausgegeben wird. Wie diese Probleme gemeistert werden können, ist Gegenstand des Kapitels 5.10 – das Stichwort lautet ICC-Profile.

Die angedeuteten Probleme erfordern, dass Farbe in irgendeiner Form mathematisch beschrieben werden muss und dadurch *kommunizierbar* wird. In den folgenden Abschnitten werden einige Farbmodelle erläutert, die für die Bildverarbeitung von Bedeutung sind.

5.3 Licht und Farbe

Fotografie bedeutet *Schreiben mit Licht*. Licht²⁶ besteht aus elektromagnetischen Schwingungen mit Wellenlängen zwischen etwa 380 und 780 nm (Abbildung 5.2). Wenn alle Wellenlängen des sichtbaren Spektralbereichs mit ähnlichen Intensitäten auftreten, erscheint das Licht weiß, wobei die Helligkeit von der Gesamtintensität abhängt.

Jeder hat das sichtbare Spektrum des Sonnenlichtes schon als Regenbogen bewundert. Diese atmosphärische Erscheinung entsteht durch Lichtbrechung an Wassertröpfchen in der Luft. Jeder Wellenlänge des sichtbaren elektromagnetischen Spektrums entspricht ein ganz bestimmter Farbton, den das menschliche Auge wahrnimmt. Licht mit einer Wellenlänge von etwa 750 Nanometern erscheint rot; violett beginnt bei etwa 380 Nanometern. Dazwischen liegen vom Violetten zum Roten fortschreitend die Wellenlängen für blaues, grünes, gelbes und orangefarbenes Licht.

Besitzt das Licht nur einen sehr engen Spektralbereich, liegt eine reine Spektralfarbe vor. Solche Farben kommen in der Natur sehr selten vor. Ein Beispiel für ihre künstliche Erzeugung ist das gelbe Licht von *Natrium*-

26 <http://de.wikipedia.org/wiki/Licht>

dampf lampen. Die meisten Farben umfassen mehrere Wellenlängen bzw. verschiedene Teilbereiche des sichtbaren Spektrums. Die wahrgenommene Farbe hängt vom Intensitätsverhältnis der auftretenden elektromagnetischen Wellen ab.

Die Wahrnehmung von Farben ist ein äußerst komplexer neurophysiologischer Vorgang. Die menschliche Netzhaut²⁷ enthält lichtempfindliche Rezeptoren, welche die *Photonen* (Lichtquanten) absorbieren und in elektrische Signale umwandeln, die danach zum Gehirn gesandt werden. Das Auge besitzt zwei unterschiedliche Typen von Rezeptoren: die farbsensitiven *Zapfen* und die farbenblinden, aber empfindlicheren *Stäbchen*. Im menschlichen Auge gibt es drei Zapfentypen, welche für die Grundfarben Rot, Grün und Blau sensibel sind (Abbildung 5.2). Nach der *trichromatischen Theorie des Farbsehens* von Young und Helmholtz sind aus diesen Grundfarben alle anderen Farben mischbar und somit für die Netzhaut mit diesen drei Rezeptortypen erkennbar.

Farbe ist ein durch das Auge vermittelter Sinneseindruck und daher eine subjektive Größe. Aus diesem Grunde bleibt die visuelle Farbbestimmung immer ungenau und schlecht reproduzierbar.

5.4 Farbmischung

Dieselbe Farbempfindung kann also sowohl durch Farben eines engen Spektralbereichs als auch durch unterschiedliche Mischungsverhältnisse verschiedener Farben entstehen. Beispielsweise enthält eine Mischung aus rotem und grünem Licht keinerlei Wellen mit der Wellenlänge des rein gelben Lichtes. Dennoch kann es dem menschlichen Auge bei geeignetem Intensitätsverhältnis der Wellen als ebenso gelb erscheinen wie die reine Spektralfarbe der Natriumdampflampe. Bei der Farbmischung entsteht eine von den Ausgangsfarben verschiedene Mischfarbe. Sie kommt zustande, wenn zwei oder mehr unterschiedliche Farbreize gleichzeitig (z.B. durch Übereinanderprojektion) oder in rascher periodischer Folge (z.B. durch eine rotierende Farbscheibe) die gleiche Netzhautstelle erregen, oder wenn sie unterhalb der Auflösungsgrenze des Auges²⁸ dicht nebeneinander liegende Netzhautpunkte treffen (wie beim Farbfernsehen oder Farbraster-

27 <http://de.wikipedia.org/wiki/Netzhaut>

28 Das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges beträgt in grober Näherung 1/1000 des Betrachtungsabstandes. Siehe auch Kapitel 1.

druck). Die additive Farbmischung gehorcht einfachen Gesetzen, welche die Grundlage für die Farbenlehre bilden. Von subtraktiver Farbmischung spricht man, wenn Farbstoffe gemischt werden (im Farbkasten oder beim Farbdruck) oder Strahlung durch hintereinander angeordnete Farbfilter spektral beeinflusst wird. Beim farbigen Druck werden keine Farben (engl. colour) additiv gemischt, sondern Farbmittel (engl. dye, ink, paint). Deren Wirkung ist subtraktiv, da sie dem auffallenden Licht bestimmte Farbanteile entziehen.

5.4.1 Die additive Farbmischung

Mit den Primärfarben Rot, Grün und Blau kann also durch Mischen entsprechender Anteile jede beliebige Farbempfindung hervorgerufen werden. Wird blaues, grünes und rotes Licht gleicher Intensität übereinander projiziert (addiert), entsteht weißes Licht (Abbildung 5.4). Rot, Grün und Blau werden auch als additive Grundfarben oder als Lichtfarben bezeichnet.

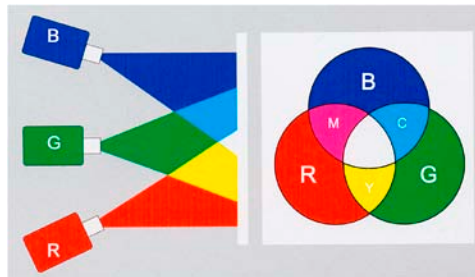


Abb. 5.4: Additive Farbmischung

Mischt man nur zwei dieser Farben zu gleichen Teilen, entstehen hieraus wiederum neue Farben. Aus Blau und Grün wird ein leuchtendes Hellblau, genannt Cyan (C). Aus Rot und Blau entsteht ein leuchtendes Pink, genannt Magenta (M), und aus Rot und Grün wird Gelb (Yellow, Y). Die neue Lichtfarbe ist heller als die sich mischenden Farben, da sich die Strahlungsenergie addiert.

Der Bereich von Farben, der unter bestimmten Bedingungen oder durch ein bestimmtes Verfahren dargestellt werden kann, wird als *Farbraum* bezeichnet; in diesem Fall handelt es sich um den *RGB-Farbraum*.

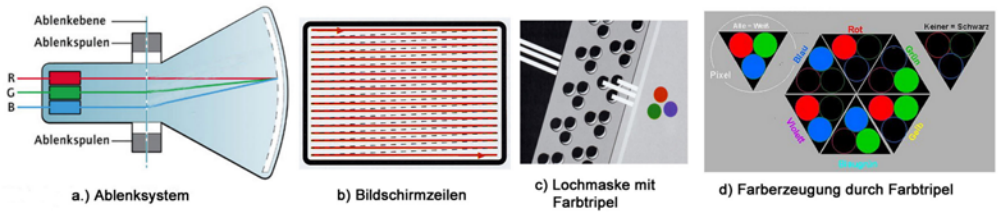


Abb. 5.5: Ablenkungssystem und Farberzeugung bei Monitorröhren

Anwendungsbeispiele für die additive Farbmischung sind Farbfernseher und Computer-Monitore. Abbildung 5.5 zeigt das magnetische Ablenkungssystem einer typischen Fernseh- bzw. Monitorröhre. Die drei Elektronenstrahlen für die Anregung der roten, grünen und blauen Phosphorpunkte werden zeilenförmig über die Frontseite der Röhre geführt und dabei, dem Bildinhalt entsprechend, in der Intensität moduliert. Ein Bildpunkt (Pixel) sind je drei verschiedenfarbige Leuchtpunkte (Abbildung 5.5 c und d) zugeordnet. Die Leuchtpunkte liegen so dicht beieinander, dass das Auge sie nicht einzeln, sondern nur den Mischeffekt wahrnimmt. Durch eine präzise Lochmaske ist sichergestellt, dass jeder Elektronenstrahl nur Leuchtpunkte „seiner“ zugeordneten Farbe trifft. Werden alle drei Leuchtpunkte mit der gleichen Intensität angesteuert, wird im Auge die Farbempfindung Weiß erzeugt.



Abb. 5.6: Flachbildschirm als Kamera-Display

Abbildung 5.6 zeigt die additive Farbmischung bei Flachbildschirmen am Beispiel eines Kamera-Displays.

5.4.2 Die subtraktive Farbmischung

Die subtraktive Farbmischung wäre einfacher verständlich, wenn in der deutschen Sprache zwischen (additiven) *Farben* (englisch: colour) und *Farbmitteln* (engl. dye, ink, paint) unterschieden würde. Deren Wirkung ist subtraktiv, da sie dem auffallenden Licht bestimmte Farbanteile entziehen.

Die meisten für das Auge wahrnehmbaren Farben entstehen also dadurch, dass eine stoffliche Oberfläche aus dem auffallenden weißen Licht bestimmte Wellenlängenbereiche absorbiert und nur den Rest reflektiert (Körperfarbe oder Oberflächenfarbe). Die sichtbare Farbe resultiert aus dem Mischungsverhältnis der reflektierten Wellenlängen. Man spricht dabei von subtraktiver Farbmischung, da aus dem auftreffenden Licht bestimmte Farben entfernt werden. Die subtraktive Farbenmischung ergibt sich auch beim Durchgang von Licht durch farbige Filter.

Die subtraktive Farbmischung ist eine Grundlage für den Farbendruck in allen Druckverfahren. Hierzu benutzt man beim Dreifarbendruck drei Teilfarbauszüge: je einen für Cyan, Magenta und Yellow. Durch Übereinanderdruck dieser drei Farben lassen sich zusammen mit dem Weiß des Bedruckstoffes alle Mischfarben erzielen; die Farben müssen *lasierend* (durchscheinend) sein. Beim Vierfarbendruck (Abbildung 1.7) kommt Schwarz zur Unterstützung der Zeichnung und zur Verbesserung des Schwarzgehalts hinzu.

Abbildung 5.7 soll die Entstehung von Körperfarben veranschaulichen. Werden aus dem weißen Licht (bestehend aus R, G und B) zwei der drei Grundfarben entfernt, bleibt eine (additive) Grundfarbe übrig.

Wird jedoch nur eine der Grundfarben absorbiert, entsteht eine neue Farbe: Beim Entfernen von Rot entsteht Cyan (= Blau + Grün). Bei der Absorption von Grün bleibt Magenta (= Blau + Rot) übrig und bei der Entfernung von Blau entsteht Gelb (Yellow = Grün + Rot). *Cyan*, *Magenta* und *Yellow* werden auch *subtraktive Grundfarben* genannt. Im Gegensatz zu den *Lichtfarben* werden sie auch als *stoffliche Farben* bezeichnet.

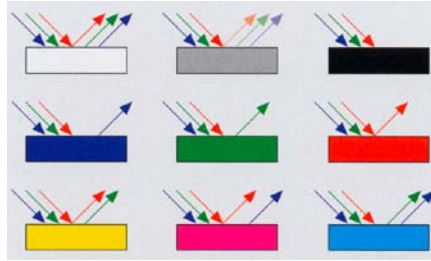


Abb. 5.7: Entstehung der Körperfarben

Die *subtraktiven Grundfarben* entstehen also, wenn bei der additiven Farbmischung nur zwei der drei Grundfarben vorhanden sind (siehe auch Abbildung 5.4). Die dritte Farbe, die zur additiven Bildung von Weiß noch fehlt, nennt man *Ergänzungsfarbe* (zu Weiß) oder *Komplementärfarbe*. Die Komplementärfarbe wird bei der Entstehung der subtraktiven Farben dem weißen Licht entzogen. Zum Beispiel ist Blau komplementär zu Yellow, denn dieses entsteht aus Rot und Grün – zu Weiß fehlt daher noch Blau. Die additive Farbmischung mit der jeweiligen Komplementärfarbe ergibt Weiß.

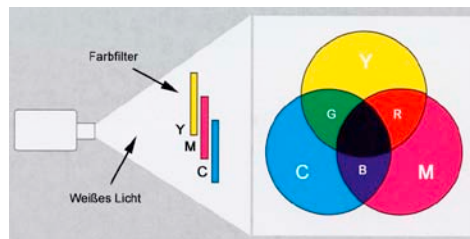


Abb. 5.8: Subtraktive Farbmischung

Beim Mischen gleicher Anteile von *Farbpigmenten* der Farben Cyan, Magenta und Yellow sollten alle Anteile des weißen Lichtes absorbiert werden und beim Druck *Schwarz* entstehen (Abbildung 5.8). Wegen der nicht idealen physikalischen Eigenschaften der Pigmente gelingt dieses jedoch nicht – es entsteht oft ein dunkles Braun. Daher wird beim Drucken Schwarz hinzugefügt, um eine ausreichende *Tiefe* zu erreichen.

Der normale Vierfarbdruck erfolgt auf der Basis CMYK, wobei K für **Black** steht; manchmal wird auch der Ausdruck **Keycolor** (= Schlüssel-farbe) verwendet. Abbildung 1.7 zeigt die farbigen Druckraster beim Vier-

farbendruck. Die vier Druckraster sind um die Rasterwinkel gegeneinander verdreht, um das Entstehen von *Moiré-Mustern* bei regelmäßigen Bildstrukturen zu minimieren. An den Stellen, an denen sich alle vier Raster schneiden, entstehen *Rosettenmuster*. Bei Tintendruckern werden die Druckerpunkte der vier Farben unregelmäßig verteilt, was die Tonwertübergänge gegenüber dem Rasterdruck erheblich verbessert.

5.5 Der sechsteilige Farbkreis

Lichtfarben (R, G, B) und stoffliche Farben (C, M, Y) stehen in einem sehr engen Verhältnis zueinander. Aus zwei beliebigen Farben der einen Art entsteht immer eine Farbe der anderen Art. Darüber hinaus gibt es zu jeder Farbe das Gegenstück im anderen Modell – die Komplementärfarbe. Diese Zusammenhänge kann man sich einfach am sechsteiligen Farbkreis verdeutlichen (Abbildung 5.9).

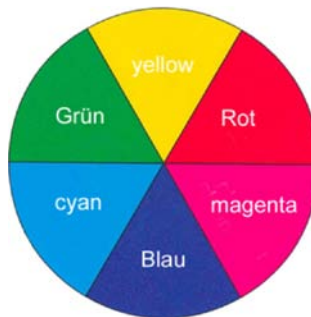


Abb. 5.9: Sechsteiliger Farbkreis

Jede Farbe lässt sich aus den beiden Nachbarfarben bilden. Gelb wird aus Rot und Grün additiv gebildet, Rot besteht aus Magenta und Gelb. Auf der gegenüberliegenden Seite des Kreises befindet sich die jeweilige Komplementärfarbe. Für Gelb ist es Blau, für Rot ist es Cyan. Je stärker auch die Komplementärfarbe in einem Farbton vertreten ist, desto ungesättigter ist der Farbeindruck.

Die Komplementärfarbe ist in der *Bildbearbeitung* sehr wichtig. Farben treten in Bildern selten völlig rein auf – zum Beispiel besteht Rot nicht nur aus Magenta und Yellow. In den meisten Fällen ist auch etwas Cyan vorhanden. *Bei der Veränderung von Rot ist es oft wirksamer, die Komplementärfarbe zu verändern als die Anteile von Magenta und Yellow zu beein-*

flussen.

Ist keine Komplementärfarbe vorhanden, ist die Farbe gesättigt. Bei Rot entspräche dieses 0% Cyan, 100% Magenta und 100% Yellow.

Bilder, die mit einem Scanner oder einer Digitalkamera eingelesen und anschließend gedruckt werden sollen, müssen vor dem Drucken vom RGB- in den CMYK-Farbraum umgewandelt werden (*Farbseparation*). Im nicht-professionellen Bereich erfolgt dieses – vom Anwender unbemerkt – direkt im Druckertreiber des Tintenstrahl-Druckers. Soll das Bild als Vorlage für den Offsetdruck dienen, sollte die *Farbseparation* in enger Abstimmung mit der Druckerei erfolgen.

5.6 Die Farbdarstellung im Computer

Bildschirmfarben entstehen durch additive Farbmischung; die meisten Bearbeitungsvorgänge bei der Bildbearbeitung erfolgen ebenfalls in diesem Farbraum. Jede Farbe hat also einen Rotwert, einen Grünwert und einen Blauwert. Jeder der drei Werte wird durch eine Zahl zwischen 0 und 255 definiert.

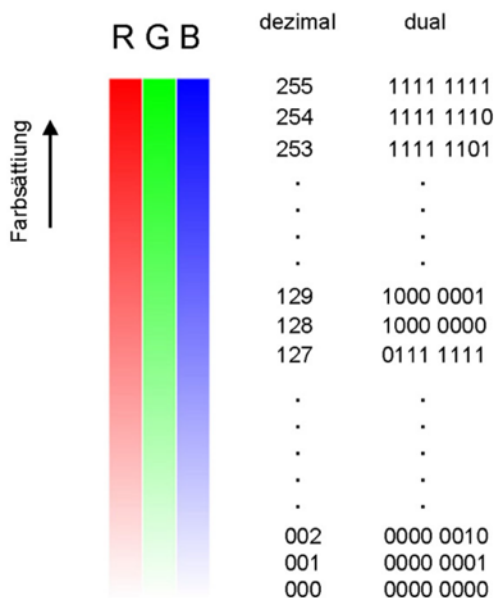


Abb. 5.10: 8-Bit-Digitalisierung der RGB-Farben

Diese Werte basieren auf der Arbeitsweise der Computer mit einer 8-stelligen Dualzahl als Basiseinheit (*Byte*, siehe Kapitel 4). Durch ein Byte können 256 verschiedene Werte dargestellt werden, die den Dezimalzahlen 0 bis 255 entsprechen. 256 Stufen je Farbwert sind ausreichend, wenn diese wirklich zur Verfügung stehen. Da bei der Bildbearbeitung bei allen Arbeitsschritten Rundungsfehler auftreten, stehen oft nur 7 oder 6 Bit als Farbinformation zur Verfügung, was nur 128 oder 64 Stufen je Farbe entspricht; dieses führt dann zu sichtbaren Farbtonabrissen. Wenn die Randbedingungen (Scanner, Kamera, Bildbearbeitungssoftware) dieses zulassen, sollte im 16-Bit-Mode gearbeitet werden.

Das Prinzip der 8-Bit-Darstellung wird in den Abbildungen 5.10 und 4.2 vereinfacht dargestellt. Der Wert 0 bedeutet, dass kein Anteil an der betreffenden Grundfarbe vorhanden ist. Der Wert 255 bedeutet maximalen Anteil an der betreffenden Grundfarbe. Reines Rot hat somit die Werte RGB 255,0,0. Die Rot-, Grün-, und Blauwerte in reinem Schwarz betragen jeweils 0, während eine Farbkombination von 100 % Rot, 100% Grün und 100% Blau (also RGB 255, 255, 255) reines Weiß ergibt, woraus auch das Prinzip der additiven Farbmischung deutlich wird. Mit diesem Schema können bis zu $256 \times 256 \times 256 \approx 16,8$ Mio. unterschiedliche Farben definiert werden. Diese Zahl ist zwar sehr beeindruckend; sie ist jedoch irreführend und eignet sich mehr für Werbezwecke.

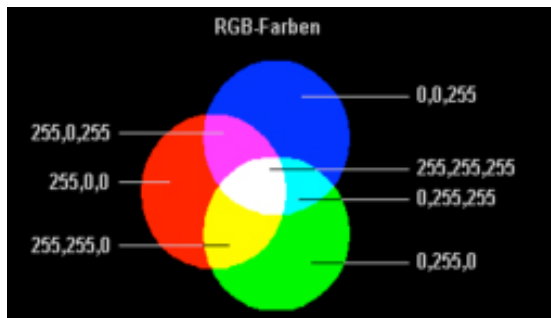


Abb. 5.11: Definition von RGB-Farben

Da es beispielsweise sehr viele verschiedene Rottöne gibt, muss also definiert werden, welche Farbe mit der Angabe *Rot* gemeint ist. Dieses erfolgt durch die Festlegung eines bestimmten *Arbeitsfarbraumes* (Kapitel 5.8).

5.7 Farbmodelle

Farbmodelle sind 3D-Koordinatensysteme, die alle sichtbaren Farben eines bestimmten *Farbraums* (engl.: color gamut) enthalten. *Farbraum* ist die Bezeichnung für einen Bereich von Farben, der unter bestimmten Bedingungen oder durch ein bestimmtes Verfahren dargestellt werden kann, z.B. RGB oder CMYK. Im Folgenden sollen drei für die Bildbearbeitung wichtige Farbmodelle kurz dargestellt werden.

5.7.1 Das HSB-Farbmodell

Diese vom RGB-Farbmodell abgeleitete Darstellung basiert auf der menschlichen Farbwahrnehmung und beschreibt eine Farbe mit den Begriffen *Hue* (*Farbton*), *Saturation* (*Sättigung*) und *Brightness* (*Helligkeit*). Das Modell stellt sich als tonnenförmiges Gebilde dar, welches die Farbebenen enthält – von unten nach oben mit stetig steigender Helligkeit.

Der Farbton wird als Gradzahl zwischen 0 und 360 Grad auf dem Standard-Farbkreis angegeben, mit Rot als Bezugsfarbe (0°).

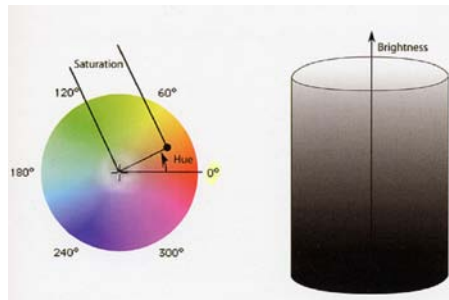


Abb. 5.12: Das HSB-Farbmodell

Die Sättigung ist die Stärke oder Reinheit der Farbe. Sie beschreibt den Grauanteil im Verhältnis zum Farbton und wird als Prozentwert zwischen 0 % (grau) und 100 % (gesättigt) gemessen. Auf dem Standard-Farbkreis nimmt die Sättigung von der Mitte zum Rand hin zu.

5.7.2 Das CIE-Yxy-Farbmodell

Bereits im Jahre 1931 wurde von einer internationalen Kommission das in Abbildung 5.13 dargestellte Farbdreieck festgelegt, das wegen seiner Form auch *Schuhsohle* genannt wird. Dieses Normfarbsystem beruht nicht auf einem technischen Gerät, sondern auf der Farbwahrnehmung des menschlichen Auges. Die zweidimensionale Fläche umfasst alle wahrnehmbaren Farben, wobei die gesättigten Spektralfarben entlang der äußeren Linie liegen. Jeder Farbe ist dabei ein bestimmter Punkt innerhalb des Koordinatensystems zugeordnet. Die nur in einer dreidimensionalen Ansicht darstellbare Y-Achse enthält die unterschiedlichen Helligkeiten; alle Farben mit gleicher Helligkeit liegen auf einer Ebene.

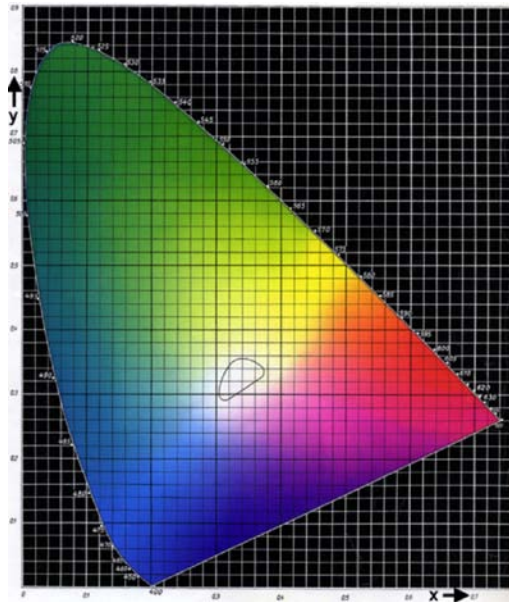


Abb. 5.13: Das CIE-Yxy-Farbdreieck ("Schuhsohle")

Die Wellenlängen der reinen Spektralfarben sind auf der gekrümmten Umrandung angegeben. Die untere gerade Kante enthält die Farben, die durch Mischung der roten und blauen Farben an beiden Enden des Spektrums entstehen (*Purpurlinie*). Mit diesem Modell ist es möglich, das Farbspektrum von Monitoren und den verschiedenen Druckfarben anschaulich darzustellen (siehe Kapitel 5.8).

5.7.3 Das CIE-L*a*b*-Farbmodell

Das CIE-Yxy-Farbendreieck (Abbildung 5.13) beruht auf der Farbwahrnehmung des menschlichen Auges. Bei diesem System tritt das Problem auf, dass die Abstände zwischen den Farben nicht den empfundenen Farbunterschieden entsprechen (sie sind nicht *gleichabständig*). Die grünen Farben nehmen im Farbendreieck einen sehr weiten Raum ein.

Um diese Unzulänglichkeiten zu überwinden, wurde von der CIE 1976 das L*a*b*-Farbmodell entwickelt (Kurzform: CIE-Lab-Modell oder auch Lab-Modell. Die Sterne haben eine historische Bedeutung). Das Modell dient der geräteunabhängigen Farbbeschreibung und umfasst die Farbräume des RGB- und des CMYK-Modells.

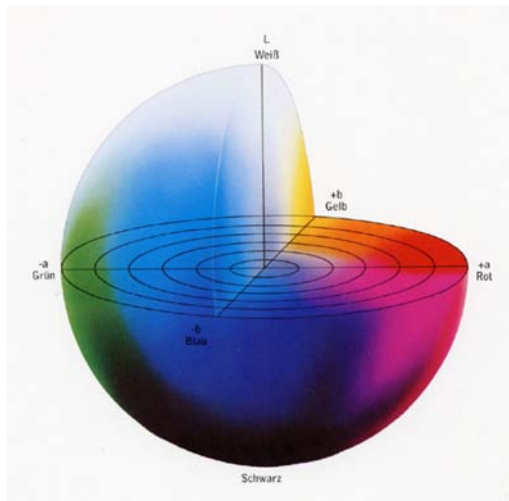


Abb. 5.14: Das CIE-L*a*b*-Farbmodell

Das Lab-Farbmodell hat die Form einer Kugel (Abbildung 5.14). Die vertikale L-Achse beschreibt die Helligkeit (*Lightness*). 0% entspricht Schwarz und 100% Weiß, das vom Menschen empfundene mittlere Grau liegt in der Mitte bei $L = 50$.

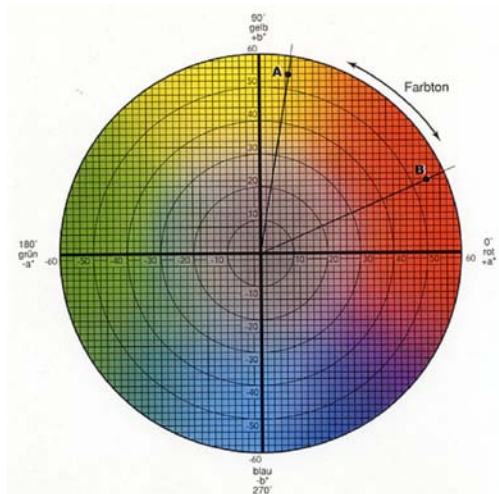


Abb. 5.15: Farbdefinition im Lab-Farbmodell

Im CIE-Lab-Modell liegen alle Farbtöne gleicher Helligkeit auf einer kreisförmigen, flachen Ebene, auf der sich die a- und b-Achsen befinden (Abbildung 5.15). Positive a-Werte sind rötlich, negative a-Werte grünlich, positive b-Werte gelblich und negative b-Werte bläulich. Am Umfang der Farbscheibe liegen die reinen Farbtöne mit hoher Sättigung. Nach innen nimmt die Sättigung bis zur Achse ab, dort ist sie Null (unbunt, grau). Komplementärfarben liegen einander gegenüber. Die Helligkeit ändert sich in vertikaler Richtung von 0 (Schwarz) bis 100 (Weiß).

Wird eine Farbe in CIE-Lab definiert, so beschreibt L die Helligkeit, a den Rot/Grünwert und b den Gelb/Blauwert.

Im fotografischen Bereich und in der *Druckvorstufe* nimmt die Bedeutung des Lab-Farbmodells ständig zu. *Adobe Photoshop* arbeitet intern im Lab-Modus und der Benutzer kann dieses Farbmodell auch verwenden – Anfängern wird davon aber unbedingt abgeraten. Bei der Umwandlung von Farb- in Graustufenbilder kann der Lab-Farbraum interessant sein, da nach dem Löschen der Farbkanäle a und b nur die Helligkeitsinformation L übrig bleibt.

5.8 Monitor-, Druck- und Arbeitsfarbräume

Bisher wurden die additive und die subtraktive Farbmischung erläutert sowie die Möglichkeit, Farben durch Angabe von Koordinaten im CIE-Farbdreieck oder im Lab-Farbmodell zu beschreiben. Außerdem wurde gezeigt, wie auf dem Monitor Farben durch additive Mischung der Grundfarben Rot, Grün und Blau erzeugt werden; die Sättigung der jeweiligen Anteile wird durch eine Zahl zwischen 0 und 255 beschrieben. Der Monitor ist bei der Bildbearbeitung die *Bearbeitungszentrale*. Es interessiert daher, welche Farben von Monitor dargestellt werden können. Die Abbildungen veranschaulichen, dass die Farbe eines Bildpunktes (pixel) durch drei Phosphorpunkte (Farbtripel) bestimmt wird, die bei den Bildröhren durch drei Elektronenstrahlen zum Leuchten angeregt werden. Trägt man die Leuchtfarben der Phosphore in das CIE-Farbdreieck (Abbildung 5.16, links) ein, so spannen diese Punkte ein Dreieck auf, in welchem sich alle vom Monitor darstellbaren Farben befinden. Die einzelnen CRT-Monitore unterscheiden sich nicht sehr voneinander, da die Bildröhren-Hersteller ähnliche Phosphore verwenden. Diese Aussage bezieht sich nicht unbedingt auf TFT-Flachbildschirme²⁹.

Die auf dem Monitor darstellbaren Farben sind (additive) RGB-Lichtfarben. Vergleicht man diesen Farbraum mit dem (subtraktiven) CMYK-Druckfarbraum, so ergeben sich Bereiche, die entweder nicht vom Monitor oder nicht durch den Druck dargestellt werden können (Abbildung 5.16, rechts). Hier sei noch angemerkt, dass es *den* Druckfarbraum nicht gibt; die Farbwiedergabe hängt immer von der Kombination Druckfarbe/Papier (Druckmedium) ab.

Man erkennt, dass bestimmte auf dem Monitor dargestellte Farben nicht gedruckt werden können und umgekehrt. Diese Tatsache muss man als Bildbearbeiter zuerst einmal verinnerlicht haben. Es gibt eine ganze Branche, die sich damit befasst, den größeren Farbraum der in der Natur vorhandenen additiven Lichtfarben in dem kleinen Farbraum der subtraktiven Stoff-Farben darzustellen.

Es gibt jedoch noch ein weiteres Problem. In Kapitel 5.6 wurde gezeigt, dass der Computer die Farben in je einem roten, grünen und blauen Kanal darstellt. Doch welcher gesättigte rote Farbton ist der Angabe RGB 255,0,0 zugeordnet? Ist es Karmin-Rot oder Bordeaux-Rot? Es muss festgelegt

29 <http://de.wikipedia.org/wiki/FI%C3%BCssigkristallanzeige>

werden, welche Farbe bei der Angabe (reines) Rot, Grün oder Blau gemeint ist. Dieses erfolgt durch Festlegung der RGB-Werte im CIE-Farbdreieck.

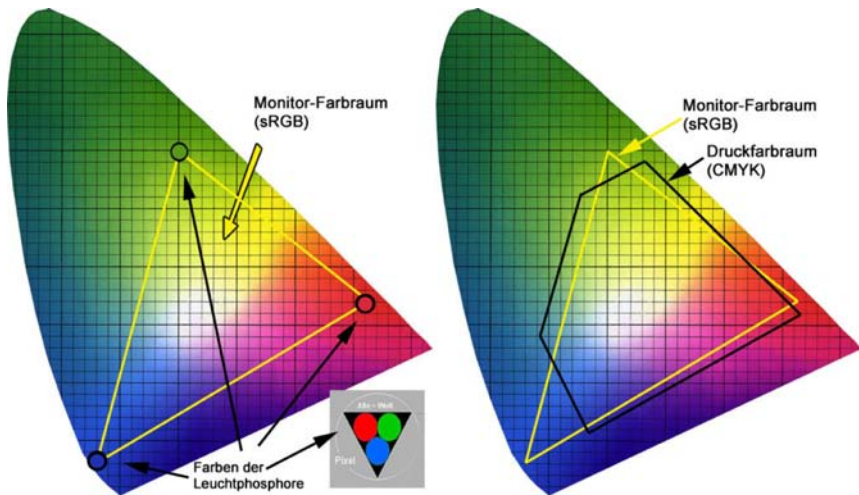


Abb. 5.16: Monitor- und Druckfarbraum

Programme zur Bildbearbeitung haben vordefinierte *Arbeitsfarbräume*, die vom Benutzer gewählt werden können, z.B. *sRGB* oder *Adobe RGB*³⁰. Wird ein Arbeitsfarbraum im *Farbmanagement* definiert, erhalten ihn alle neu erstellten Bilder. Wenn ein Bild schon ein eingebettetes ICC-Profil enthält, welches nicht mit dem Arbeitsfarbraum übereinstimmt, entscheidet der Anwender, ob das Bild in den Standardarbeitsfarbraum konvertiert werden soll, oder ob der Farbraum des Bildes beibehalten wird.

Ein Arbeitsfarbraum ist vom Benutzer so festzulegen, dass er alle Farben einschließt, welche Eingabegeräte (Scanner, Kameras) erfassen und Ausgabegeräte ausgeben können. Er darf auch nicht zu groß sein, da sonst bei 8 Bit Farbtiefe (256 verschiedene Tonwerte pro Farbkanal) Abrisse in feinen Tonwertverläufen auftreten können. Wenn es in Farbverläufen zu Abstufungen kommt, ist möglicherweise der Arbeitsfarbraum sehr viel grö-

³⁰ RGB-Standard-Farbräume siehe z.B.

<http://www.mediencommunity.de/content/arbeitsfarbr%C3%A4ume>

ßer als der Scannerfarbraum.

Bei der Installation von Geräten und Bildbearbeitungsprogrammen wird häufig als Vorgabe der *sRGB-Farbraum* verwendet. Dieser hat den Vorteil, dass er dem Monitorfarbraum entspricht. Für die ausschließliche Bilddarstellung auf dem Monitor (z.B. Internet) ist dieses der optimale Farbraum. Da jedoch in diesem Arbeitsfarbraum die im CMYK-Farbraum druckbaren Blau- und Grüntöne beschnitten werden, muss für Druckzwecke der Arbeitsfarbraum erweitert werden.

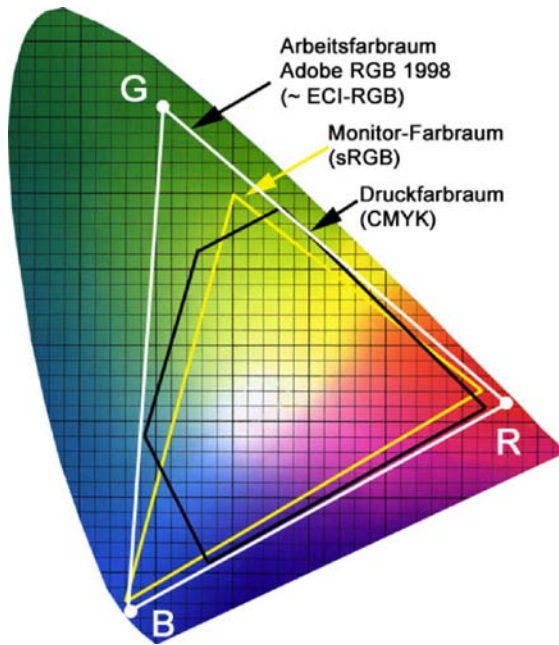


Abb. 5.17: Vergleich Monitor- und Druckfarbraum

Wenn man den Arbeitsfarbraum *Adobe RGB (1998)* verwendet, liegt man für Druckzwecke recht gut. Abbildung 5.17 zeigt, dass dieser Farbraum sowohl den Monitor- als auch den dargestellten Druckfarbraum umfasst. Häufig wird auch der *ECI-RGB-Farbraum*³¹ empfohlen, dessen Farbkordinaten etwa *Adobe RGB* entsprechen (nicht zu verwechseln mit CIE-

RGB!). Die beiden Farbräume unterscheiden sich im Gamma-Wert³² und in der Definition des Weißpunktes³³. Auf Details kann in dieser Übersichtsdarstellung nicht eingegangen werden.

Der Arbeitsfarbraum wird bei *Photoshop* (nicht *PS Elements*) unter *Bearbeiten/Farbeinstellungen* gewählt. Die Information über den gewählten Arbeitsfarbraum lässt sich zusammen mit dem Bild abspeichern (einbetten). Dadurch sieht das Bild auf anderen Computern so aus wie auf dem eignen Rechner – vorausgesetzt, dass dort entsprechende *Profile* installiert sind³⁴.

5.9 Farbraumtransformationen (gamut mapping)

Arbeitsfarbräume und CMYK-Farbräume sind also unterschiedlich groß. Wenn man den größeren RGB-Farbraum in den kleineren CMYK-Farbraum umrechnen will, muss man sich entscheiden, wie dieses geschehen soll. Für die *Farbraumtransformation* (engl. *gamut mapping*) stehen vier Methoden zur Wahl: *Perzeptiv/wahrnehmungsorientiert*, *relativ farbmimetrisch*, *absolut farbmimetrisch* und *Sättigung*. Die unterschiedlichen Umrechnungsverfahren werden auch *Rendering Intents* genannt³⁵.

Eine der wichtigsten Regeln bei der Bildbearbeitung ist, die *Zeichnung* des Originalbildes zu erhalten – dieses erfolgt bei Fotos durch die Einstellung *perzeptiv/wahrnehmungsorientiert*. Diese komprimiert alle Originalfarben so stark, dass sie mit den Druckfarben darstellbar sind. Dabei können unter Umständen auch Farben geändert werden, die eigentlich im Zielfarbraum vorhanden wären. Dieses nimmt man i.a. in Kauf, weil auf der anderen Seite *Farbunterschiede*, die außerhalb des CMYK-Farbtraums liegen, erhalten bleiben. Das menschliche Auge ist empfindlicher für Farbbeziehungen als für spezielle Farben.

32 Die von einem Monitor produzierten Werte von Schwarz bis Weiß sind nicht linear. Die Gamma-Anpassung gleicht die nicht lineare Tonreproduktion von Ausgabegeräten wie Monitortröhren aus. Siehe auch <http://de.wikipedia.org/wiki/Gammakorrektur>.

33 Die Koordinaten, an denen die roten, grünen und blauen Phosphor-Farben bei voller Intensität Weiß ergeben. Siehe auch <http://de.wikipedia.org/wiki/Weißpunkt>. Siehe auch <http://www.ivent.de/fotografieren-farben-falsch-weissabgleich>

34 Wenn der ECI-RGB-Farbraum nicht zur Verfügung steht, kann er unter <http://www.eci.org/en/downloads> bezogen werden.

35 Details siehe: http://de.wikipedia.org/wiki/Rendering_intent

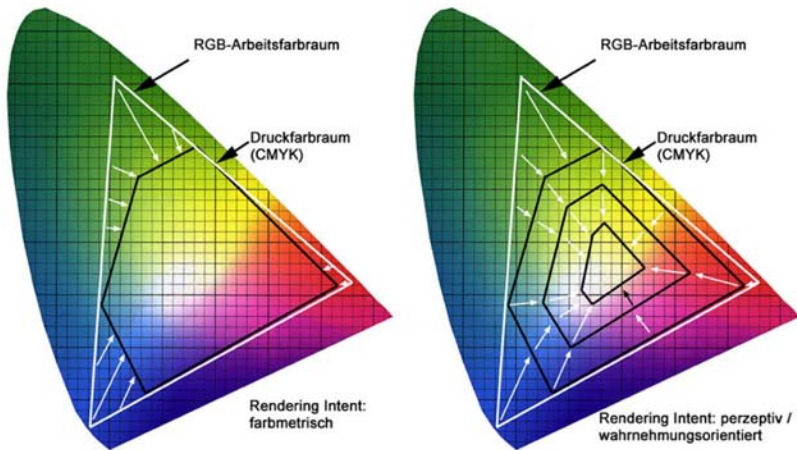


Abb. 5.18 Rendering Intents "farbmetrisch" und "perzeptiv/wahrnehmungsorientiert"

Bei der Farbraumtransformation *perzeptiv/wahrnehmungsorientiert* wird also der größere RGB-Farbraum in den kleineren CMYK-Farbraum komprimiert (Abbildung 5.18, rechts). Dieses lässt sich anschaulich mit einem T-Shirt vergleichen, das zu heiß gewaschen wurde und dadurch einläuft; dabei werden sowohl die Bereiche am Rand als auch in der Mitte des Shirts/Farbraums verändert. *Farbunterschiede* bleiben erhalten, auch wenn ihnen eine neue Position im Farbraum zugewiesen wird. Ziel des perzeptiven Rendering Intents ist es, den *Gesamteindruck* der Originalfarben in der Bildwiedergabe beizubehalten.

Bei den *farbmetrischen Transformationen* werden alle Farben außerhalb des Zielfarbraums auf einen Punkt am Rande gesetzt – beim T-Shirt würden die Ränder abgeschnitten. Ziel des farbmetrischen Rendering ist es, den Teil der Originalfarben, der innerhalb des Zielfarbraums liegt, in der Bildwiedergabe beizubehalten.

Die Option *Sättigung* versucht, kräftige Farben (auf Kosten der Farbtreue) zu erstellen. Der Quellfarbumfang wird in den Zielfarbumfang skaliert, aber anstelle des Farbtons wird die relative Sättigung erhalten, so dass sich Farbtöne bei der Skalierung in einen kleineren Farbumfang verschie-

ben können. Diese Priorität eignet sich für Grafiken, bei denen das Verhältnis zwischen den Farben weniger wichtig ist als leuchtende und satte Farben.

5.10 ICC-Profil

Wird eine Bilddatei auf zwei unterschiedlichen Geräten ausgegeben, erhält man in den meisten Fällen zwei farblich unterschiedliche Ergebnisse. Die Farbwiedergabe ist geräteabhängig. Sogar bei zwei Ausgabegeräten des gleichen Modells können leichte Unterschiede auftreten. Dieses gilt für sämtliche Geräte der Verarbeitungskette (Abbildung 5.21).

Zur Beseitigung dieser Probleme gründeten eine Reihe von Industrieunternehmen, darunter Adobe, Agfa, Apple, Kodak und Microsoft, 1993 das „International Color Consortium“ (ICC) mit dem Ziel, einen offenen, hersteller- und plattformunabhängigen Standard für den Austausch von Farbdaten zu schaffen. Voraussetzung dabei ist, dass sämtliche in den Verarbeitungsprozess eingebundene Geräte *profiliert* werden. Das bedeutet, dass die Geräteeigenschaften messtechnisch erfasst werden.

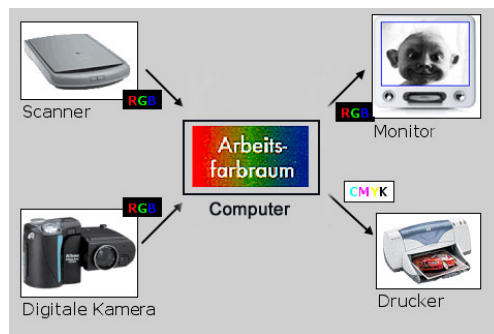


Abb. 5.21: Verarbeitungskette der digitalen Fotografie

Ein *ICC-Profil* beschreibt den gerätespezifischen Farbraum und die Farbfehler eines Gerätes. ICC-Profile können über Betriebsgrenzen hinweg ausgetauscht werden und sie sollten prinzipiell in jedem verwendeten Farbmanagement-System zu gleichen Ergebnissen führen. Voraussetzung ist dabei, dass sich alle Teilnehmer an bestimmte Standards halten und die-

se auch technisch beherrschen³⁶.

Ein ICC-Profil entsteht, indem man die Ergebnisse eines realen Gerätes mit den idealen Werten des Lab-Farbraumes vergleicht. ICC-Profile sind Abweichungsbeschreibungen vom standardisierten CIE-Lab-Farbraum.

Zur Erstellung eines *Scannerprofils* nimmt man eine Vorlage mit vielen kleinen unterschiedlichen Farbfeldern (IT8-Vorlage, Abbildung 5.22) und vermisst diese mit einem Spektralphotometer, um die Lab-Werte zu bekommen. Nun lässt man den Scanner die selbe Vorlage einlesen und vergleicht Soll- und Ist-Werte. Diese Differenz ist das Profil des Scanners. Beim nächsten Scan kann man das Profil anwählen und mit den Rohdaten verrechnen lassen.

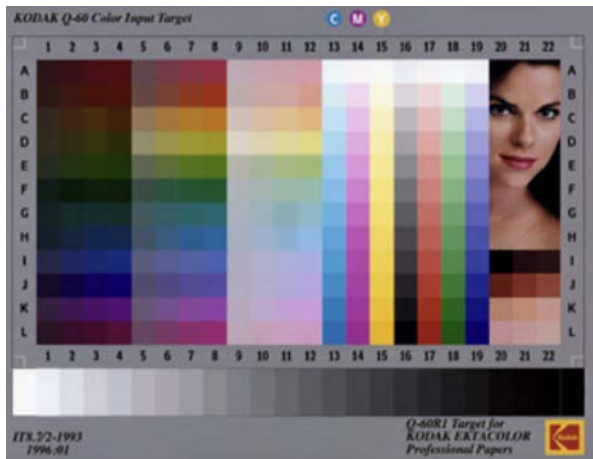


Abb. 5.22: IT8-Vorlage zur Scanner-Profilierung

Zur Bestimmung eines *Monitorprofils* befestigt man ein Farbmessgerät an der Scheibe und sendet definierte Lab-Werte auf den Monitor. Aus der Differenz zwischen den gesendeten und gemessenen Daten ergibt sich das Monitorprofil.

36 Siehe <http://de.wikipedia.org/wiki/ICC-Profil>



Abb. 5.23: Farbmessgerät zur Monitor-Profilierung

Für ein *Ausgabeprofil* druckt man bekannte CMYK-Werte und ermittelt mit einem Spektralphotometer die entstandenen Lab-Werte. Dabei darf nicht vergessen werden, dass der gesamte Druckprozess Einfluss auf das Ergebnis hat. Neben dem Drucker sind auch Papier und Druckfarbe von entscheidender Bedeutung – ändert man nur einen Parameter, erfordert dieses auch ein neues Profil. Viele Hersteller von Druckfarben und hochwertigen Papieren stellen für bestimmte Kombinationen ICC-Profile zur Verfügung, die jedoch oft nur eine grobe Näherung darstellen.

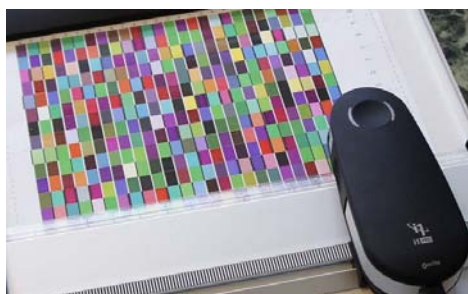


Abb. 5.23: Ermittlung eines Ausgabeprofiles

ICC-Profile werden in den Workflow eingebunden, wie Abbildung 5.24 schematisch zeigt. An dieser Stelle kann nur das grundsätzliche Prinzip der

ICC-Profile angesprochen werden. Für weitergehende Fragen wird auf spezielle Literatur verwiesen.

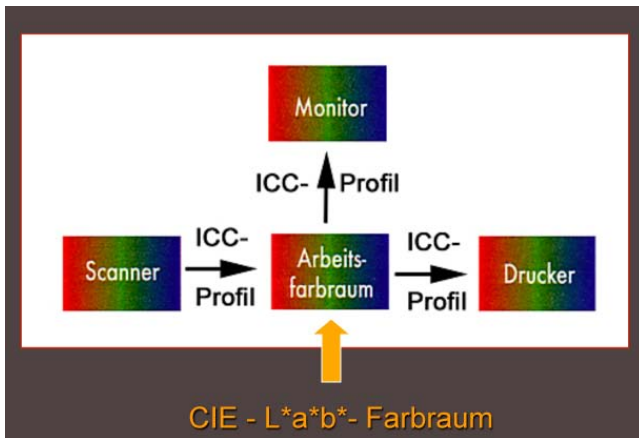


Abb. 5.24 Einbindung der ICC-Profile in den Workflow

6. Speichern und Archivieren von Bilddaten

Bei der Langzeitarchivierung *analoger fotografischer Bilder* kann die natürliche Alterung durch eine sachgemäße Lagerung verlangsamt werden. Da Kopiervorgänge im Allgemeinen zu Qualitätseinbußen führen, sollten möglichst Originale für die Nachwelt aufbewahrt werden. Der Vorteil analoger Bilder besteht darin, dass die Information ohne weitere technische Hilfsmittel direkt interpretiert werden kann. Metadaten³⁷ können häufig auf dem Medium (z.B. der Bildrückseite) in unmittelbar lesbarer Form festgehalten werden.

Hinsichtlich der Langzeitarchivierung haben digital gespeicherte Bilder gegenüber analogen völlig andere Eigenschaften. Bei richtiger Handhabung lassen sich digitale Daten beliebig oft kopieren, Original und Kopie sind identisch. Digital gespeicherte Daten können nicht kontinuierlich zerfallen. Diese Daten können entweder vollständig (und richtig) gelesen werden, oder es treten Fehler auf, welche im Prinzip den ganzen betroffenen Datensatz wertlos machen. Zur Erkennung und Korrektur von Fehlern lassen sich jedoch spezielle Codierungen und Algorithmen einsetzen. Bei digitalen Archiven kommt noch eine weitere Schwierigkeit hinzu: Die Datenträger selbst lassen sich nur mit technischen Hilfsmitteln lesen und interpretieren.

Bei der digitalen Speicherung fotografischer Bilddaten, ist der Datenträger nur ein Glied der Kette, die aus

- dem *Dateiformat*, in welchem die Bilddaten gespeichert werden,
- einem geeigneten *Archivierungsprogramm* oder einer Bilddatenbank
- sowie dem *Speichermedium* als Datenträger (z.B. Festplatte, Magnetband oder optisches Speichermedium) besteht.

³⁷ Metadaten sind definiert als Daten, die andere Daten beschreiben. Bei Fotografien können es z.B. eine Beschreibung des Bildthemas, Namen der abgebildeten Personen, Ort und Zeit, Photograph, aber auch technische Informationen wie Filmtyp, Belichtungszeit usw. sein.

6.1 Dateiformate

Ein *Dateiformat* (Dateityp)³⁸ ist eine Konvention, die angibt, auf welche Weise die in der Bitfolge einer Datei enthaltene Information zu interpretieren ist. Jedes Dateiformat legt zunächst fest, wie der Inhalt in der Datei codiert ist und welche den Inhalt beschreibenden Informationen an welcher Stelle der Datei zu finden sind. Bei Fotografien wird die Bildinformation punktweise als Raster-Grafik gespeichert. Raster-Grafiken eignen sich gut zur digitalen Darstellung von Bildern, die weiche Farb- bzw. Graustufenverläufe oder eine sehr komplexe Struktur aufweisen (siehe auch Kapitel 4 und 5.6).

Aus der *Farbtiefe* (Bits pro Pixel) ergibt sich die Anzahl der *Helligkeitswerte*, die jedem Bildpunkt zugeordnet sind. Bei 8 Bit sind dieses zum Beispiel $2^8 = 256$ verschiedene Werte je *Farbkanal*. Für die drei Farben Rot, Grün und Blau ergeben sich daraus $256 \times 256 \times 256 = 16.8$ Mio. Farben für jeden Bildpunkt. Bei einer Farbtiefe von 16 Bit stehen $2^{16} = 65.536$ Helligkeitswerte je Farbkanal zur Verfügung.

Mit wachsender Farbtiefe einer Grafik steigt also auch der Speicheraufwand. Man versucht daher, die Datenmenge durch Kompressionsverfahren zu reduzieren.

Tabelle 6.1 zeigt den Speicherbedarf eines Farbfotos bei zwei üblichen Digitalkameras und einem Scanner. Da für jeden Bildpunkt die Helligkeitsinformationen für Rot, Grün und Blau gespeichert werden müssen, ist beispielsweise für eine unkomprimierte Bilddatei bei einer 6-Mio-Pixel-Kamera ein Speicherplatz von 18 MByte³⁹ erforderlich. Bei der Speicherung als unkomprimierte TIFF-Datei werden ebenfalls 18 MByte benötigt.

38 Siehe auch: <http://digicam-experts.de/wissen/1>

39 Es wird häufig nicht berücksichtigt, dass der Begriff *Mega* aus dem Zahlensystem mit der Basis 10 stammt und $10^6 = 1.000.000$ bedeutet. In der Digitaltechnik wird das Zahlensystem mit der Basis 2 verwendet, dabei bedeuten: 1 Byte = 8 Bit (Standardeinheit zur Angabe von Dateigrößen). Ein Bit ist die kleinste Informationseinheit in einem Computer. Mit dieser Binärziffer können nur zwei Zustände angegeben werden.

1 KByte = 1 KB = 2^{10} Byte = 1.024 Byte / 1 MByte = 1 MB = 2^{20} Byte = 1.048.576 Byte (sprachlich ungenau werden häufig „Mega“ und „M“ gleichgesetzt). / 1 GByte = 1 GB = 2^{30} Byte = 1.073.741.824 Byte.

| | Bildpunkte | Speicherbedarf |
|----------------------|------------|----------------|
| Kamera 6 Mio. Pixel | 6 Mio. | 18 MByte |
| Kamera 12 Mio. Pixel | 12 Mio. | 36 MByte |
| Scanner 2.700 ppi | 10 Mio. | 30 MByte |

Tabelle 6.1: Speicherbedarf eines unkomprimierten Farbfotos

6.1.1 Das TIFF-Format

Das *Tagg'ed Image File Format* (TIFF) war lange Zeit das wichtigste Bildformat in der grafischen Branche, insbesondere für den Austausch von Rastergrafiken. Es komprimiert Bilder wahlweise gar nicht oder verlustfrei – was die bestmögliche Qualität garantiert, aber zu entsprechend großen Dateien führt. Bei der Aufnahme wird das TIFF-Format heute immer stärker vom Rohdatenformat RAW verdrängt.

Das TIFF-Format wird von fast allen gängigen Anwendungsprogrammen unterstützt, die mit Raster-Grafiken arbeiten. Nachteilig wirkt sich bei TIFF die große Datenmenge aus, da hier für jeden Bildpunkt (Pixel) $3 \times 8 = 24$ Bit oder $3 \times 16 = 48$ Bit abgespeichert werden, was etwa 18 bzw. 32 „Megabyte“ bei einem 6-Megapixel-Bild bedeutet. Daher wird die Datenmenge oft durch Kompressionsverfahren reduziert.

Das TIFF-Format ist für die Komprimierung ohne Verschlechterung der Bildqualität geeignet. Die *LZW-Komprimierung* (nach den Erfindern Lempel-Ziv-Welch) entfernt keine Informationen. Sie reduziert lediglich einheitliche Blöcke von Bildpunkten per Kurzbeschreibung. Die Datei speichert nicht mehr Bildpunkt für Bildpunkt, sondern fasst ganze Blöcke zu Blockübersichten zusammen. Bei üblichen Motiven reduziert das die Dateigröße um 20...30 Prozent. Bei Grafiken mit großen, einfarbigen Bereichen sind die erreichbaren Komprimierungsgrade größer.

Das TIFF-Format ist sehr verbreitet und wird somit auf längere Zeit schreib- und lesbar sein. Die Formatdokumentation wurde von der Firma Adobe offen gelegt. Der Vorteil dieses Formates ist, dass alle Informationen der Bilddatei gespeichert werden und eine hohe Farbtiefe möglich ist. Nachteil ist die Größe der Dateien. Bei der Archivierung sollte auf die LZW-Komprimierung verzichtet werden. Das TIFF-Format wird für die Archivierung empfohlen.

6.1.2 Das JPEG-Format

In der Digitalfotografie wird überwiegend, vor allem bei Kompaktkameras, das *JPEG-Format*⁴⁰ verwendet (Joint Photographic Expert Group). In Wirklichkeit ist JPEG kein echtes Dateiformat, sondern ein Komprimierungsverfahren, das auf einer Variante des TIFF-Formats beruht.

Der Vorteil des JPG-Formates ist sein geringer Speicherplatz-Bedarf aufgrund der Komprimierung der Bilddaten. Mathematische Verfahren reduzieren die Datenmenge beim Erstellen einer Bilddatei und müssen umgekehrt beim Öffnen einer Datei wieder angewendet werden, um das Bild wieder herzustellen. Die Kompressionsstrategie von JPEG beruht darauf, dass Helligkeitsinformationen für das menschliche Auge wichtiger sind als Farben. Beim Sehen in der Dämmerung können wir noch Konturen erkennen, wenn schon lange keine Farben mehr sichtbar sind. JPEG speichert – gleichmäßig über das Bild verteilt – bei der Mehrzahl der Bildpunkte nur die Helligkeitsinformation. Die übrigen Pixel enthalten die vollständigen Helligkeits- und Farbwerte. Beim Öffnen der Datei errechnet das Bildbearbeitungsprogramm durch Mittelwertbildung die fehlenden Informationen.

Ohne Komprimierung würde jeder Punkt eines Farbbildes drei Byte für die drei Farbanteile rot, grün, blau erfordern und ein Bild von z.B. 6 Megapixeln rund 18 Megabyte belegen. JPG-Dateien kommen mit einem Bruchteil dieser Datenmenge aus (Tabelle 6.2).

Das JPG-Format ist geeignet für Bilder mit einer Farbtiefe von 8 Bit mit kontinuierlichen Farb- und Helligkeitsübergängen zwischen benachbarten Bildpunkten, wie es für Fotos typisch ist.

Die Komprimierung funktioniert in Abhängigkeit vom Motiv unterschiedlich gut; detailreiche Bilder lassen sich schlechter komprimieren als solche mit großen, schwach konturierten Flächen. Die Komprimierung bringt sichtbare oder unsichtbare Qualitätsverluste mit sich. Das bedeutet, dass man nach dem Öffnen (Dekomprimieren) einer JPG-Datei ein Bild erhält, das nicht exakt dem Ausgangsbild gleicht.

Tabelle 6.2 zeigt am Beispiel einer 18 MByte-Bilddatei die Möglichkeiten und Grenzen der verlustbehafteten JPEG-Komprimierung.

Digitale Kameras bieten häufig die Kompressionsraten 1/4, 1/8 und

40 <http://digicam-experts.de/wissen/3>

1/16 an.

| Kompressionsrate | Speicherbedarf | Subjektive Bildqualität |
|------------------|------------------|---|
| 1 | 18 Mbyte | Original |
| 1/4 ... 1/5 | 4,5...3,6 MByte | Mit bloßem Auge nicht vom Original unterscheidbar |
| 1/5 ... 1/10 | 3,6 ..1,8 MByte | Exzellente Qualität |
| 1/10 ... 1/20 | 1,8...0,9 MByte | Gute Qualität |
| 1/20 ... 1/30 | 0,9...0,6 MByte | Sichtbare Vergrößerung |
| 1/30 ... 1/40 | 0,6...0,45 MByte | „Klötzchengrafik“ |

Tabelle 6.2: Kompressionsfaktoren bei der verlustbehafteten JPEG-Komprimierung

JPEG-Bilder werden bei jedem Abspeichern neu verlustbehaftet komprimiert, was bei häufiger Bearbeitung zu Qualitätseinbußen führt. Bilddateien die mehrfach bearbeitet werden sollen, sollten deshalb bis zu Erstellung der endgültigen Version in einem verlustfreien Format gespeichert werden. JPEG ist dann geeignet, wenn keine weitere Nachbearbeitung des Bildes vorgesehen ist.

JPEG-Bilder sind als *Arbeitsmaterial* für die jeweiligen Verwendungen (Publikationen, Internet) zu verstehen. Die Eignung für die Langzeitarchivierung ist umstritten.

6.1.3 Das RAW-Format

Beim *Rohdatenformat* RAW (englisch: raw = ‚roh‘) werden die Daten der Kamera nach der Digitalisierung ohne Bearbeitung auf das Speichermedium geschrieben. Diese Rohdaten werden auch als *digitales Negativ* bezeichnet, da sie für die Weiterverarbeitung bestimmt sind und noch nicht das eigentliche Endprodukt darstellen. Obwohl sich die grundlegenden Funktionsweisen der digitalen Bildsensoren verschiedener Hersteller und Modelle nicht wesentlich voneinander unterscheiden, hat sich bisher kein Standard ausgebildet, vielmehr existieren zahlreiche unterschiedliche Varianten.

Andere Formate zur Bildspeicherung erlauben es nicht, alle Informationen, die der Sensor der Kamera liefert, zu speichern. JPEG-Varianten erlauben z. B. pro Farbkanal nur 256 Helligkeitsabstufungen (8 Bit), demgegenüber enthalten Rohdatenformate meist 10, 12 oder 14 Bit an Helligkeitsinformation, was 1.024 bis 16.384 Helligkeitsabstufungen ermöglicht.

Da die Sensoren helligkeits-, nicht aber farbempfindlich sind, werden aus dem auftreffenden Licht durch das *Bayer-Filter* (Kapitel 3) die additiven Grundfarben Rot, Grün und Blau ausgefiltert. Zur Anpassung an die Empfindlichkeitskurve des Auges sind doppelt so viele Pixel mit einem Grünfilter ausgestattet, wie mit einem Rot- und Blaufilter. Um ein realistisches Bild zu erhalten, werden die Farbwerte der Nachbarpixel durch *Interpolation* in jeden Pixel einbezogen.

Während beim JPEG-Format die Farbinterpolation durch den Prozessor in der Kamera erfolgt, werden beim RAW-Format zunächst nur die Helligkeitswerte (Grauwerte) der einzelnen Sensorpunkte gespeichert. Die Interpolation (sogenanntes *Demosaicing*⁴¹) wird beim RAW-Format nicht durch die Rechenleistung des Prozessors in der Kamera limitiert sondern erfolgt erst im Computer.

Die *Gammakorrektur*⁴², der *Weißabgleich*⁴³, die Anpassung der Helligkeit und des Kontrastes, das Nachschärfen des Bildes sowie eine Rauschfilterung können durch den Anwender kontrolliert werden. Viele Digitalphotographen sehen die RAW Technologie als eines der besten Hilfsmittel an, um eine bestmögliche Bildqualität zu erzielen. Nur das RAW-Format erlaubt es, alle Informationen, die der Kamera-Sensor liefert, zu speichern.

Die Expansion der Anzahl proprietärer⁴⁴ RAW-Formate und der Übergang zu einer Verschlüsselungspraxis von RAW-Formaten seitens der Kamerahersteller, haben Befürchtungen hinsichtlich der *Haltbarkeit* von RAW-Formaten für die Langzeitarchivierung laut werden lassen. Einige Hersteller, deren Kameras proprietäre RAW-Formate produzierten, haben ihr Geschäft bereits aufgegeben, mit unbekannten Konsequenzen für zukünftigen Zugang zu diesen Digitalbildern. Also: Keine Empfehlung für die Langzeitarchivierung!

41 <http://de.wikipedia.org/wiki/Demosaicing>

42 <http://de.wikipedia.org/wiki/Gammakorrektur>

43 <http://de.wikipedia.org/wiki/Wei%C3%9Fabgleich>

44 herstelleregebunden

Die internationale OpenRAW-Initiative bemüht sich um Offenlegung bzw. Standardisierung des RAW-Formats⁴⁵.

Das *Digital Negative* (DNG, dt. *digitales Negativ*)-Format ist ein im September 2004 vorgestelltes Rohdatenformat, das nach Angaben des Herstellers Adobe mit dem Ziel entwickelt wurde, die verschiedenen proprietären Formate der Herstellerfirmen zu ersetzen und sich als Standard zu etablieren⁴⁶. Hinsichtlich der Langzeitarchivierung gilt (noch) die gleiche Einschränkung wie bei den RAW-Formaten.

6.1.4 Der PDF/A-Standard und seine Ziele

Die bisher beschriebenen Dateiformate beziehen sich auf die Speicherung von *Bildern*. Um *elektronische Dokumente* unabhängig vom ursprünglichen Anwendungsprogramm, vom Betriebssystem oder von der Hardwareplattform wiedergeben zu können, wurde das *Portable Document Format*⁴⁷ (PDF; deutsch: (trans)portables Dokumentenformat) entwickelt. Ein Leser einer PDF-Datei soll das Dokument immer in der Form betrachten und ausdrucken können, die der Autor festgelegt hat.

Die *Variante PDF/A*⁴⁸ wurde von der ISO⁴⁹ für die *Langzeitarchivierung* genormt. Mit PDF/A gelingt die sichere, rechtsgültige Archivierung von Dokumenten, einfach, automatisierbar und zukunftstauglich.

Das visuelle Erscheinungsbild bleibt über die Zeit erhalten, unabhängig von den Werkzeugen und Systemen zur Herstellung, Speicherung und Reproduktion. Es wird weder eine bestimmte Archivierungsstrategie vorgeschrieben noch gibt sie Ziele für die Archivierung vor. Es werden vielmehr Anforderungen an die Form elektronischer Dokumente definiert, um deren Reproduzierbarkeit, auch nach Jahrzehnten sicherstellen zu können. PDF/A hat sich als der bevorzugte Standard für die Archivierung elektronischer Dokumente durchgesetzt.

45 <http://www.openraw.org/info/index.html>

46 http://de.wikipedia.org/wiki/Digital_Negative

47 http://de.wikipedia.org/wiki/Portable_Document_Format

48 <http://de.wikipedia.org/wiki/PDF/A> , <http://www.pdfa.org/?lang=de>

49 International Organisation for Standardization

6.2 Die Archivierung digitaler Daten

Mit dem Verlust von digitalen Daten wird es sich wohl ähnlich verhalten wie mit der Klimadiskussion. Wir ahnen oder wissen alle, dass da etwas auf uns zukommt, aber keiner mag anfangen etwas dagegen zu tun, bis es dann nicht mehr zu verstecken ist.

Zitat Dr. Rita Hofmann, Forschungsleiterin Ilford Imaging

Digital Information lasts Forever, or Five Years, Wichever comes First.

Überschrift einer Studie von Jeff Rothenberg, 2001

Die Vorteile der digitalen Arbeitsweise sind inzwischen unbestritten und die Technik hat einen sehr hohen Stand erreicht. Ein wichtiges Problem ist dabei bisher weitgehend ungelöst: Die Langzeitspeicherung der digitalen Bilddaten⁵⁰.

Besondere Aufmerksamkeit verdienen zunächst die terminologischen Unterschiede, wenn man es mit der *Elektronischen Archivierung* zu tun hat. In der Sprache der Informationsspezialisten und der Archivare umfasst der Begriff *Archivierung* völlig andere Dimensionen. Die *IT-Welt* geht dabei von einem Zeitraum von ca. 15 Jahren, bestenfalls von wenigen Jahrzehnten aus. *Archivare* haben bei ihrer Tätigkeit die Ewigkeit im Blick. Die IT-Welt beglückt uns in immer kürzeren Zyklen mit Innovationen, während sich die Fachleute in den Archiven bemühen, die Daten für die Nachwelt lesbar und authentisch zu sichern. Man wird sich der digitalen Revolution nicht ernsthaft in den Weg stellen wollen, trotzdem sei die Überlegung gestattet, ob der digitale Zeitgeist in jedem Fall einen Gewinn bringt.

Für digitale Daten gilt: Wer seine Daten nicht regelmäßig auf der nächsten technologischen Ebene sichert (*Daten-Migration*), dem können wichtige Bilder verloren gehen. Für die digitale Archivierung kann noch kein Weg empfohlen werden. Möglichkeiten sind:

50 Brümmer, Hans: Der „digitale Alzheimer“ – wie retten wir unser kulturelles Erbe? PhotoPresse, Heft 23 /2007. <http://www.hansbruemmer.de/index.php/langzeitarchivierung.html>

- *Nichts tun.* Dieses Verfahren könnte man auch als *digitale Archäologie* bezeichnen.
- *Das Computer-Museum.* Dieses erfordert den Erhalt des ganzen Systems (Hardware, Software) unter Arbeitsbedingungen.
- *Emulation.* Dabei werden obsolete Systeme auf neuen Computern nachgebildet.
- *Migration.* Das bedeutet kopieren, kopieren, ... Dabei wird nicht das Medium erhalten, sondern die Daten. Beim Kopieren darf der richtige Zeitpunkt nicht verpasst werden, da sonst die Daten verloren sind.

Man kann digitale Daten auch auf langzeitstabilem Film sichern. Film ist ein Träger mit hoher Datendichte, der sich für die Speicherung von Dokumenten und Bildern gleichermaßen eignet. Seit 1961 wird z.B. die Mikroverfilmung von Archivalien durchgeführt. Dieses ist eine der Maßnahmen zum Schutz von Kulturgut bei bewaffneten Konflikten gemäß der Haager Konvention. Die Sicherungsfilme werden im Barbarastollen in Oberried bei Freiburg im Breisgau eingelagert⁵¹.

Die Speicherung kann nicht nur in analoger Form, sondern auch als Punktmuster (zweidimensionaler digitaler Barcode) erfolgen. Dabei lassen sich auch Zusatzinformationen (Metadaten) speichern. Dieses Verfahren ist bei entsprechender Lebensdauer der Filme migrationsfrei. Bei der Belichtung digitaler Daten auf Film kommen hoch auflösende digitale Filmrecorder oder – für besonders hohe Ansprüche – Laserbelichter zum Einsatz. Die Bilder lassen sich später bei Bedarf mit Scannern re-digitalisieren. Während noch vor einigen Jahren entsprechende Entwicklungsarbeiten⁵² mit großem Aufwand betrieben wurden, ist es inzwischen still um diese Verfahren geworden.

51 <http://www.uni-muenster.de/Forum-Bestandserhaltung/downloads/oberriedstollen.pdf>

52 http://www.hansbruemmer.de/tl_files/pdf-ordner/profoto_06_08.pdf ,
<http://www.dgph.de/node/82>

6.3 Archive und Bilddatenbanken

Ein *Archiv* ist eine Einrichtung zur systematischen Erfassung, Ordnung, Verwahrung, Verwaltung und Verwertung von Schriftgut, Bild- und Tonträgern (Archivalien). Moderne Archive sind ausschließlich elektronisch aufgebaut. Der Begriff der elektronischen Archivierung wird sehr unterschiedlich benutzt. Durch die sich ständig verändernden Technologien, immer neuer Software, Formate und Standards, ist der Aufbau und die Pflege eine große Herausforderung für die Informationsgesellschaft. Immer mehr Information entsteht digital (*digital born*) und die Ausgabe auf Papier ist nur noch *eine* mögliche Präsentation des ursprünglichen elektronischen Dokuments.

Eine *Bilddatenbank* ist ein Programm zur Verwaltung digitaler Bilddaten. Bilddatenbankprogramme können eine Vielzahl von Dateiformaten erfassen und ausgeben. Um einen systematischen Zugriff zu ermöglichen, können die Bilder mit Schlagworten und Kategorien belegt oder in Gruppen zusammengefasst werden. Zur gezielten Suche kann eine Auswahl getroffen und die Bilder können unabhängig vom eigentlichen Speicherort in einem Katalog mit miniaturisierten Ansichten betrachtet und ausgewählt werden. Zur Weiterverarbeitung in anderen Programmen lassen sich die Bilder exportieren. Umfangreichere Bilddatenbanksysteme ermöglichen die Bereitstellung und Verwaltung von Bildarchiven in Intranet oder Internet⁵³.

Wir wissen noch nicht, wie man digitale Publikationen, künstlerische Werke, Bild- und Tondokumente usw. so archiviert, dass sie dauerhaft lesbar und damit für alle Zukunft zugänglich bleiben. Bereits heute sind digital gespeicherte Werke auf neuen Medien ein selbstverständlicher, unverzichtbarer Bestandteil der Arbeit in Wissenschaft, Forschung, Kultur und öffentlicher Verwaltung. Wenn dieses kulturelle Erbe für die nachfolgenden Generationen erhalten und die Verfügbarkeit der digitalen Ressourcen auf Dauer sichergestellt werden soll, muss das weltweit ungelöste Problem der langfristigen Zugänglichkeit digitaler Dokumente angegangen werden. Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt *nestor*⁵⁴ bündelt das verfügbare Know-how und die Kompetenzen zur Langzeitarchivierung. Ziel von *nestor* ist es, bestehende Aktivitäten zur Langzeitarchivierung in Deutschland durch Austausch und Ko-

53 Eine umfassende Darstellung finden Sie auf der Website <http://www.ivent.de/digitale-bildarchive-bilddatenbanken>.

54 http://www.langzeitarchivierung.de/Subsites/nestor/DE/Home/home_node.html

operation auf nationaler und internationaler Ebene vorwärts zu bringen.

Die *nestor*-Arbeitsgruppen befassen sich mit Kriterien und Maßstäben, die an vertrauenswürdige digitale Archive angelegt werden sollen und nach denen diese evaluiert werden können. Beteiligt sind Mitarbeiter aus Bibliotheken, Archiven, Museen, Datenzentren sowie Zertifizierungsexperten. Ziel ist eine kooperative Infrastruktur, in der vielfältige Fachkompetenzen bei der Problemlösung zusammenwirken⁵⁵.

6.3.1 Speichermedien und ihre Haltbarkeit

Während altes Pergament und Papier bei guter Lagerung viele hundert Jahre haltbar sind, trifft dieses auf neue Speichermedien nicht zu. Die meisten Publikationen aus der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts sind auf Papier gedruckt, das sich durch Säurefraß zersetzt. Ältere Drucke und Handschriften haben andere Probleme: Bei Verwendung eisenhaltiger Tinte können die Buchstaben bei Feuchtigkeitseinwirkung einfach „wegrosten“ und es entstehen Löcher in den Seiten.

Filme, Fotos und Magnetbänder haben ebenfalls eine begrenzte Haltbarkeit. Noch kürzer ist die Lebensdauer digitaler Speichermedien wie Disketten und CDs. Datenträger verlieren ihre Informationen durch Umwelteinflüsse (z. B. durch Magnetfelder in der Nähe von Disketten oder Magnetbändern) oder sie werden durch chemische oder physikalische Einwirkungen so stark verändert, dass sie keine Informationen mehr speichern können oder nicht mehr auslesbar sind (z. B. UV-Strahlung auf CD-ROM).

Oft scheitert die Lesbarkeit auch nur daran, dass zu einem späteren Zeitpunkt die passenden Geräte und Programme nicht mehr vorhanden sind. 1979 wurden von der Raumsonde *Pioneer* Daten vom Saturn übertragen und bei der NASA auf Magnetbändern archiviert. Obwohl die Daten auf vier verschiedenen Datenträgern gespeichert waren (9-Spur-Magnetband, 7-Spur-Magnetband, Lochstreifen und Lochkarte), sollen sie 1994 nicht mehr lesbar gewesen sein, da bei der NASA für keinen dieser vier Datenträger mehr Lesegeräte vorhanden waren⁵⁶.

55 Siehe auch: *nestor-Handbuch – Eine kleine Enzyklopädie der digitalen Langzeitarchivierung*. Download unter: <http://www.nestor.sub.uni-goettingen.de/handbuch/index.php>

56 <http://www.payer.de/digitalebibliothek/digbib02.htm>

Lebensdauer von Speichermedien in Jahren

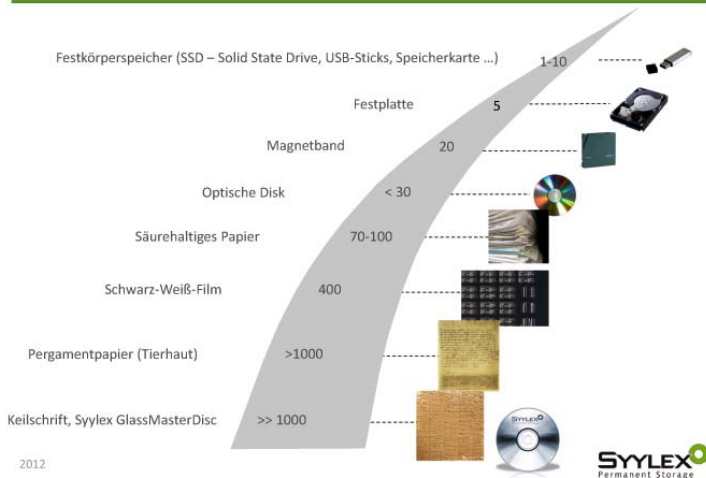


Abb. 6.1: Lebensdauer von Speichermedien

Da digitale Informationen nicht unmittelbar zugänglich sind, können diese nur gelesen werden, wenn ein Programm und ein Betriebssystem vorliegen, das den Inhalt einer Datei *versteht*. Da viele Betriebssysteme und Programme ein proprietäres Verfahren zur Codierung der Daten einsetzen, ist eine Lesbarkeit von Daten nicht mehr gegeben, wenn ein Betriebssystem oder ein Programm nicht weiterentwickelt wird. Verschärft wird dieses Problem durch die Politik einiger Softwarehersteller, neue Programmversionen mit veränderten Datenformaten zu veröffentlichen, die ältere Datenformate des gleichen Programms nicht vollständig nutzen können.

Ähnlich wie bei den Datenformaten ist die Situation bei den Trägerformaten. Eine Datei, die vollständig und in einem noch lesbaren Dateiformat vorliegt, kann von fast allen Computerbenutzern nicht mehr gelesen werden, wenn sie sich auf einer 5,25"-Diskette befindet. Laufwerke, die dieses Format lesen können, sind seit dem Ende der 1990er Jahre kaum noch zu finden.

6.3.2 Auswahl der Speichertechnologie

Zurzeit existieren keine Speichermedien, auf denen digitale Daten langfristig bewahrt werden können. Daher muss die Beobachtung der Entwicklung im Bereich der Speichertechnologien ein fester Bestandteil des Prozesses der Langzeiterhaltung sein. Es sollte in regelmäßigen Abständen überprüft werden, ob die verwendete Technologie veraltet ist und ob neue Technologien sinnvolle Alternativen bieten⁵⁷.

Die Speichermedien lassen sich in drei Gruppen einteilen:

- Magnetische Datenträger. Dazu gehören Festplatten, Disketten, Magnetbänder.
- Optische Datenträger, wie CDs, DVDs oder Blu-Ray.
- Elektronische Datenträger, wie Flash-Speicher, z.B. USB-Sticks.

Bei der Auswahl einer geeigneten Technologie sollten u.a. folgende Faktoren beachtet werden.

Ausgereiftheit

Länger am Markt befindliche Systeme sind im Allgemeinen weiter verbreitet und technisch ausgereifter. Neue Speichertechnologien können fehlerbehaftet sein und ihre zukünftige Verfügbarkeit ist nicht sichergestellt. Außerdem sollte die Speichertechnologie von einer möglichst großen Anzahl von Betriebssystemen unterstützt werden.

Haltbarkeit

Alle zur Zeit im Gebrauch befindlichen Speichermedien haben durch mechanischen Verschleiß, Kratzer, Entmagnetisierung, chemische Prozesse und andere Einflüsse eine begrenzte Haltbarkeit. Auf eine rechtzeitige Migration der Daten (siehe Kapitel 6.4) ist daher zu achten.

Handhabung

Da es noch keine migrationsfreie Speicherlösung gibt, ist bei großen Datenmengen auf eine einfache Handhabung und kurze Übertragungszeiten

⁵⁷ Der folgende Abschnitt orientiert sich an den Tipps zur „Langzeiterhaltung digitaler Daten in Museen“. http://files.dnb.de/nestor/sheets/18_speichermedien.pdf

zu achten. Um es vorweg zu nehmen: Als *Langzeit*-Speichermedium eignen sich aus heutiger Sicht nur Festplatten, da bei diesen – trotz der geringen Haltbarkeit – der Aufwand bei einer Datenmigration geringer ist als bei den anderen Datenträgern.

6.3.3 Analyse aktueller Speichertechnologien

Disketten⁵⁸ (nicht geeignet)

Seit den 1970er Jahren sind Disketten in verschiedenen Formaten auf dem Markt. Diese sind empfindlich gegen mechanische Beschädigung und magnetische Beeinflussung. Auch wegen der geringen Speicherkapazität sowie Schreib- und Lesegeschwindigkeit sind diese Datenträger für eine Langzeitspeicherung nicht geeignet. Neuere Rechner besitzen keine Diskettenlaufwerke mehr.

Festplatten⁵⁹ (geeignet)

Festplatten sind seit den 1980er Jahren Bestandteil von Personal Computern. Diese bestehen aus einer oder mehreren rotierenden Scheiben, mit magnetisierbaren Oberflächen, die mittels Schreib- und Leseköpfen abgetastet werden. Die mechanische Abnutzung der feinmechanischen Elemente ist eine der häufigsten Ursachen für einen Betriebsausfall. Bei günstigen Umgebungsbedingungen (keine äußeren Magnetfelder, keine Temperaturschwankungen) und nicht zu intensiver Nutzung kann von einer Haltbarkeit von 3...10 Jahren ausgegangen werden.

Festplatten und vor allem *RAID-Festplattensysteme*⁶⁰ sind relativ ausfallsicher und zur Zeit die beste Lösung.

Als Alternative für mechanische Festplatten werden heute auch *SSD-Festplatten* (Solid State Drive)⁶¹ eingesetzt. Diese sind geräuschlos, stoßunempfindlich und können die Arbeitsgeschwindigkeit des Rechners merklich erhöhen. Eine SSD ist ein Datenspeicher, der ähnlich arbeitet wie ein

58 <http://de.wikipedia.org/wiki/Diskette>

59 <http://de.wikipedia.org/wiki/Festplattenlaufwerk>

60 „Redundant Array of Independent Disks“, also „Redundante Anordnung unabhängiger Festplatten“, siehe: <http://de.wikipedia.org/wiki/RAID>

61 <http://de.wikipedia.org/wiki/Solid-State-Drive>

USB-Stick. Die Daten werden auf Flash-Speicherchips (siehe Elektronische Speicher) geschrieben. Die einzelnen Speicherzellen sind nicht unbegrenzt überschreibbar, je nach Bauart werden 5.000 bis 10.000 Schreibvorgänge garantiert. Tests haben aber gezeigt, dass in der Praxis höhere Werte erreicht werden. Wegen dieser Begrenzung und vor allem wegen der – im Vergleich zu mechanischen Festplatten – noch hohen Kosten können SSDs noch nicht für eine Langzeitspeicherung empfohlen werden.

CD/DVD⁶² (nicht geeignet)

Beschreibbare CD-R (Compact Disc) kamen Anfang der 1990er Jahre auf den Markt, einige Jahre später die DVD (Digital Versatile Disc), die ein Vielfaches der Speicherkapazität der CD-R bietet. Die Varianten CD-RW und DVD-RW sind wiederbeschreibbar. Wegen der höheren Instabilität sind sie noch weniger für die Langzeitarchivierung geeignet als die nur beschreibbaren Arten.

Die Haltbarkeit wurde in mehreren Studien untersucht. Bei allen selbst beschriebenen CDs und DVDs muss man mit Haltbarkeits-Zeiträumen von weniger als 5 Jahren rechnen. Der Grund liegt in der Anfälligkeit gegen Beschädigungen durch chemische und mechanische Veränderungen.

Inzwischen werden DVDs angeboten, die ausschließlich anorganische Materialien verwenden und dadurch eine sehr große Lebensdauer versprechen⁶³. Nach den bisherigen Erfahrungen mit Geräten der Informationstechnik ist aber Skepsis angebracht, ob in 20 oder 30 Jahren noch funktionsfähige Lesegeräte für diese Speichermedien zur Verfügung stehen.

Blu-Ray Disc (nicht geeignet)

Die technologischen Grundlagen sind ähnlich wie bei der DVD. Durch Verwendung eines kurzwelligeren, blauen, Lasers erhöht sich die Speicherkapazität auf 25 bis 50 GB. Aus den gleichen Gründen wie bei CDs und DVDs können Blu-Ray Discs für eine langfristige Datenspeicherung nicht empfohlen werden.

62 <http://www.hansbruemmer.de/index.php/langzeitarchivierung.html> sowie <https://de.wikipedia.org/wiki/DVD>

63 <http://www.mdisc.com/> , <https://de.wikipedia.org/wiki/M-DISC> , <http://www.syylex.com/>

Magnetbänder (geeignet)

Diese Datenträger werden in der Digitaltechnik schon sehr lange verwendet. Inzwischen haben sich Systeme mit Kassettenbändern gegenüber offenen Spulenbändern durchgesetzt. Das LTO-Format (Linear Tape Open)⁶⁴ hat sich zu einem gängigen Standard etabliert. Magnetbänder sind für hohe Zuverlässigkeit im Einsatz bekannt und werden daher bei Banken, Versicherungen usw. zur Sicherung wichtiger Daten verwendet. Bei optimaler Lagerung (kühl, trocken, staubfrei...) sind Haltbarkeitszeiten von 30 Jahren und mehr zu erwarten. Für den Einsatz sprechen die günstigen Preise pro GB und die ausgereifte Technik. Im PC-Bereich haben sich diese Speicher (noch) nicht etabliert.

Elektronische Speicher (nicht geeignet)

Elektronische Speicher verwenden *Flash-Speicherelemente*⁶⁵, die eine nichtflüchtige Speicherung bei niedrigem Energiebedarf ermöglichen. Die Information (ein Bit) wird in Form einer elektrischen Ladung auf einem *Floating Gate* eines *Feldeffekttransistors* gespeichert und dadurch dessen elektrische Leitfähigkeit beeinflusst. Diese Ladung wird durch den quantenmechanischen Tunneleffekt auf das Floating-Gate gebracht bzw. wieder entfernt.

Neben den bereits erwähnten *SSD-Festplatten* gehören dazu *USB-Speichersticks*⁶⁶ und *SD-Speicherkarten*⁶⁷.

USB-Speichersticks sind Datenträger in kompakten Gehäusen. Nach Herstellerangaben bleiben darauf gespeicherte Daten bis zu 10 Jahren erhalten. Die Speicherzellen verschleiß. Die Lesezyklen sind theoretisch unbegrenzt, von den Herstellern werden jedoch nur 100.000 bis 1 Mio. Schreibzyklen pro Speicherzelle garantiert.

SD-Karten (Secure Digital Memory Card) sind wohl die am häufigsten eingesetzten Speicherkarten für Digitalkameras, MP3-Player, Navigationsgeräte und sonstige Multimedia-Geräte. Da sie ebenfalls nach dem Prinzip der Flash-Speicherung arbeiten, haben auch sie die schon beschriebenen

64 http://de.wikipedia.org/wiki/Linear_Tape_Open

65 <http://de.wikipedia.org/wiki/Flash-Speicher>

66 <http://de.wikipedia.org/wiki/USB-Massenspeicher#USB-Speicherstick>

67 <https://de.wikipedia.org/wiki/SD-Karte>

Probleme.

Speichern in der Cloud (bedingt geeignet)

Als *Cloud Computing*⁶⁸ bezeichnet man das Speichern von Daten in einem entfernten Rechenzentrum, aber auch die Ausführung von Programmen, die in der *Cloud* installiert sind. Wegen Bedenken zu Datensicherheit und Datenschutz wird die Cloud in Deutschland oft nicht genutzt. Sichere Archive sind in der Cloud nicht vorhanden. Außerdem ist immer damit zu rechnen, dass die Cloud-Dienste ihre Geschäftsbedingungen ändern, etwa das Datenvolumen einschränken oder den Dienst ganz einstellen.

Bei den frei verfügbaren Diensten ist das Datenvolumen nicht sehr groß. Zusätzlicher Speicherplatz ist vergleichsweise teuer im Vergleich zu externen Festplatten.

6.4 Strategien für eine digitale Langzeitarchivierung

Beim gesamten Archivierungsprozess müssen einige Grundsätze berücksichtigt werden:

Redundanz auf der Ebene der Datenträger. Die Daten werden nicht nur einmal, sondern identisch auf mehreren Datenträgern gespeichert.

Geographische Verteilung. Die redundanten Datenträger sollten an geografisch verschiedenen Orten aufbewahrt werden, um das Risiko eines Totalverlustes durch ein katastrophales Ereignis (Feuer, mangelnde Sorgfalt usw.) zu eliminieren.

Migration. Da eine regelmäßige Migration der Daten unumgänglich ist, muss eine langfristige Migrationsstrategie festgelegt werden. Diese Strategie muss folgende Eigenschaften aufweisen:

- Migrationszeitpunkt: Die Daten müssen früh genug migriert werden, bevor ein Datenverlust durch Alterung des Mediums oder durch Technologiewandel auftreten kann.
- Zur Erhöhung der Redundanz in Bezug auf den Technologiewechsel sollte der Migrationsprozess von einer Generation von Geräten auf die nächste *rollend* erfolgen. Eine neue Technolo-

68 https://de.wikipedia.org/wiki/Cloud_Computing

gie muss eingeführt werden, bevor die alte Technologie obsolet geworden ist. In anderen Worten: die *aktive* Generation von Speichermedien verteilt sich auf mindestens zwei Technologien, wobei eine davon *altbewährt* sein sollte.

7. Der Tinten(strahl)druck

7.1 Das Verfahren

Tintenstrahldrucker nehmen inzwischen einen großen Teil des fotografischen Druckmarktes ein. Dank verbesserter Tinten, Einsatz von Pigmenten und komplexer Oberflächenbeschichtungen übertreffen Tintendrucke – bei optimaler Materialkombination – hinsichtlich der Lichteinheit die klassischen fotografischen Materialien.

Unter Tintendruck versteht man die Erzeugung eines Bildes auf einer Oberfläche durch gesteuerte Positionierung von Tintentröpfchen. Die oft verwendete Bezeichnung Tintenstrahl-Druck⁶⁹ ist eigentlich nur für Drucker mit kontinuierlichem Tintenstrahl anwendbar (siehe 7.5, Continuous-Flow-Verfahren)⁷⁰. Die Farbe wird durch Düsen auf das zu bedruckende Papier gebracht. Beim Druck legen die Tintentröpfchen – je nach Druckverfahren – einen mehr oder weniger langen Weg bis zum Trägermaterial zurück. Dort werden sie auf bestimmte Punkte positioniert. Es entsteht ein Rasterbild, dessen Feinheit (ausgedrückt in dpi = dots per inch; dot = Punkt) durch die Tröpfchengröße begrenzt ist.

Die Tröpfchen sind so klein, dass die Feinheit des Rasters unter dem Auflösungsvermögen des Auges liegt. Tintendrucksysteme eignen sich besonders für den Farbdruk. Vorteilhaft ist die Möglichkeit, gezielt einzelne Tropfen unterschiedlicher Größe zu erzeugen.

Die Gerätekosten sind vergleichsweise niedrig. Eine annähernde Fotoqualität ist auch mit preiswerten Druckern möglich. Die zu erreichende Druckqualität ist stark abhängig von der Papierqualität.

Der erste Tintendrucker kam bereits 1952 auf den Markt (Siemens-Elema). Seitdem sind sehr viele Drucker entwickelt worden, die unterschiedliche Verfahren anwenden. Die Tintentechnologie hat in den letzten Jahren alle anderen Verfahren hinsichtlich der Anzahl verkaufter Drucker und der Anzahl neuer Typen übertroffen. Es sind die billigsten Drucker für farbige Bilder und Dokumente; sie sind zuverlässig und einfach in der Konstruktion. Bei geringeren Qualitätsansprüchen kann man auf jedes Papier drucken; brillante Farbdrukke benötigen jedoch beschichtetes Papier.

69 <http://de.wikipedia.org/wiki/Tintenstrahldrucker>

70 http://www.hs-heilbronn.de/2032391/Tintendruck__Wehl_1994_.pdf

Die Tinte besitzt eine relativ niedrige Viskosität⁷¹ und dringt in faseriges Papier ungleichmäßig ein. Gelegentlich wird es auch als nachteilig empfunden, dass der Tintendruck keine Durchschläge liefert. Die Druckkosten pro Blatt sind hoch, da der Tintenverbrauch beim Farbdruck hoch ist und teure Spezialtinten und -papiere für optimale Qualität nötig sind.

7.2 Prinzipien

Von der Vielzahl der in der Vergangenheit entwickelten Verfahren haben heute solche eine besondere Bedeutung, die nur bei Bedarf einzelne Tropfen erzeugen (*drop on demand*). Dabei erfolgt die Tropfenerzeugung entweder durch piezo-keramische Wandler oder durch Heizelemente. In speziellen Anwendungen werden allerdings auch *Continuous-Flow*-Verfahren eingesetzt.

Im Druckkopf sind mehrere Düsen übereinander angeordnet, die zeilenweise über das Papier geführt werden. Heute werden fast ausschließlich Farbdrucker eingesetzt, die für jede Farbe eigene Düsenanordnungen verwenden. Der Druck kann uni- oder bidirektional erfolgen. Im unidirektionalen Modus ist die Druckqualität häufig besser. Für hochwertige Drucke ist es sinnvoll, regelmäßige Justierung der Druckköpfe zu überprüfen.

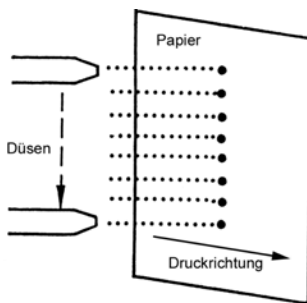


Abb. 7.1: Prinzip des Zeilendrucks

Die meisten Drucker arbeiten mit mehreren Tinten-Patronen, jeweils eine für die subtraktiven Grundfarben Cyan, Magenta und Gelb und eine weitere für die schwarze Tinte. Eine Weiterentwicklung der Drucker ver-

71 Zähigkeit, Dickflüssigkeit, innere Reibung einer Lösung.

wendet sechs Farben; neben den genannten Farben wird zusätzlich ein helles Magenta und ein helles Cyan eingesetzt. Dieses führt vor allem zu natürlicheren Hauttönen beim Druck in Fotoqualität.

Einzelne Düsen können durch Papierstaub, Luftblasen oder Eintrocknen der Tinte nach längeren Betriebspausen ausfallen. Daher besitzen die Drucker eine Reinigungsfunktion, die jedoch mit einem erheblichen Tintenverbrauch verbunden ist.

Drucker besitzen im Allgemeinen für Betriebspausen eine Parkposition, in welcher der Druckkopf geschützt und verschlossen ist. Bei vielen Geräten wird diese Position nur dann erreicht, wenn der Drucker direkt am Gerät ausgeschaltet wird. Es ist daher zu vermeiden, den Drucker durch einen zentralen Netzschalter einfach abzuschalten.

7.2.1 Tropfenerzeugung durch Piezo-Wandler

Diese elektromechanischen Wandler benutzen Scheiben oder Stäbchen, die durch einen elektrischen Spannungsimpuls eine Verformung erleiden und dadurch einen Druckimpuls im Tintenkanal erzeugen – dieser führt zum Ausstoßen eines Tropfens aus der Düse (Abbildung 7.2). Die aufwändigen Wandler besitzen eine hohe Lebensdauer und sind fester Bestandteil des Druckers (Epson).

Dieses Verfahren geht relativ schonend mit den Tinten um, da diese im Druckkopf nicht erhitzt werden; daher ist die Zahl der für die Tinten zur Verfügung stehenden Materialien größer als beim Thermo-Verfahren. Ein Problem dieser Technik sind Luftblasen, welche die Druckkopf-Kanäle verstopfen können.

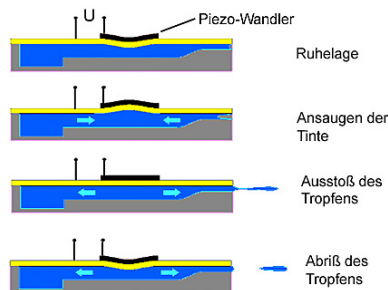


Abbildung 7.2: Piezo-Wandler

7.2.2 Tropfenerzeugung durch Heizelemente

Bei diesem Verfahren wird in unmittelbarer Nähe zur Düse durch ein kleines Heizelement Tinte zum Verdampfen gebracht. Dadurch erfolgt eine plötzliche Volumenvergrößerung, die den Ausstoß eines Tropfens bewirkt. Danach kondensiert das Gas wieder und saugt neue Tinte nach. Die Dampfblase schleudert ein Tintentröpfchen aus der Austrittsöffnung, das auf dem Papier einen Farbpunkt erzeugt.

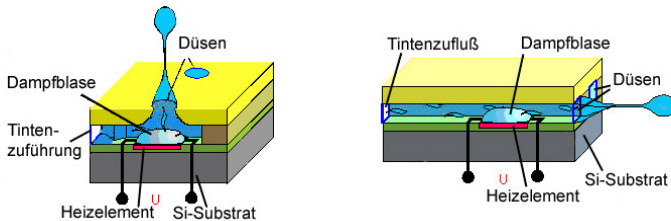


Abb. 7.3: Bubble-Jet-Verfahren (links: Side-Shooter, rechts: Edge-Shooter)

Druckköpfe dieses Prinzips werden wegen der Temperaturimpulse (bis zu 400°C) sehr viel höher belastet als die piezokeramischen Wandler. Die hohen Temperaturen am Heizelement machen dieses anfällig für Korrosionsprozesse, was einer der Gründe dafür ist, dass Thermoköpfe kurzlebiger sind als Piezoköpfe. Sie werden daher von einigen Firmen als Verschleißteil konzipiert und sind dann Bestandteil der Tintenpatrone. Verwendet wird diese Technologie z.B. von Canon (Bubble Jet) und Hewlett Packard (Thermal ink-jet).

Die bei diesem Verfahren eingesetzten Tinten müssen hinsichtlich ihrer Farbstoffe und Komponenten thermisch sehr stabil sein, da sie kurzzeitig auf 200 bis 300°C aufgeheizt werden.

7.2.3 Continuous-Flow-Verfahren

Bei diesem Verfahren wird ein unter hohem Druck erzeugter Tintenstrahl durch einen pulsierenden piezoelektrischen Wandler in gleich große Tropfen mit gleichem Abstand zerteilt. Aus dem kontinuierlichen Strahl müssen die Tropfen zu μ kg gehalten werden, die nicht auf das Papier gelangen sollen. Dazu werden unerwünschte Tröpfchen beim Flug durch eine

Ladeelektrode elektrisch aufgeladen. Die Tröpfchen, die das Papier erreichen sollen, bleiben ungeladen. Eine Ablenkelektrode lenkt die geladenen Tröpfchen in eine Auffangrinne, von wo aus sie zum Tintenbehälter zurückgeleitet werden. Zur Positionierung auf dem Papier muss die Düse relativ zum Papier bewegt oder es müssen mehrere Düsen übereinander angeordnet werden.

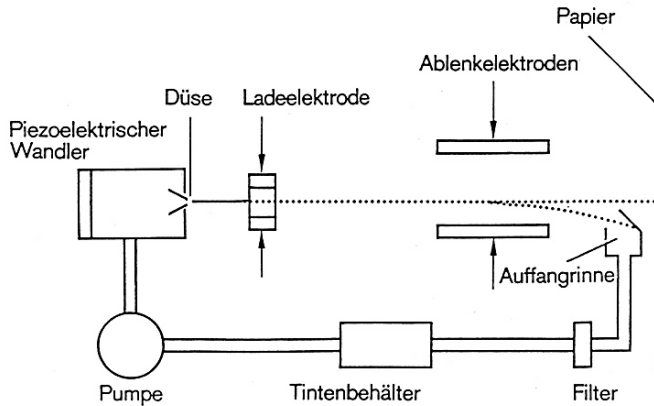


Abb. 7.4: Continuous-Flow-Verfahren

Drucker mit *kontinuierlichem Strahl* eignen sich dazu, fast beliebige Oberflächen zu bedrucken. Außerdem lässt sich fast alles verdrucken was flüssig ist, z.B. Tinten, Lacke und sogar Klebstoffe. Sie werden beispielsweise eingesetzt zum Druck von Haltbarkeitsdaten auf der Verpackung von Lebensmitteln.

Ein anderes Anwendungsgebiet haben sich die IRIS-Drucker⁷² erschlossen. Zunächst als Proof-Drucker⁷³ eingesetzt, wurden sie später zum

72 Iris-Drucker: Großformatige Continuous-Flow-Drucker für Proof- und Kunstdrucke. Die ungerasterten Bilder mit langer Haltbarkeit und einer Druckauflösung von 1.800 dpi sind auch bei geringen Betrachtungsabständen kaum vom Original zu unterscheiden.
http://www.handelswissen.de/data/branchen/Fotobranche/Foto-Spezialwissen/Verfahren/Drucken_Ausgabe/Digitaler_Edeldruck

73 Proof: Simulation eines Druckprozesses auf einem anderen Gerät zur Kostenersparnis und Qualitätskontrolle, um vorab eine Vorschau des endgültigen Ergebnisses zu erzielen. Man unterscheidet zwischen einem Softproof auf dem Bildschirm und einem Hardproof, der auf dem Proof-Drucker ausgegeben wird. Proof-Drucker müssen einen größeren Farbraum haben als der zu simulierende Druckprozess.

Standard im Kunstbetrieb. Die Drucke werden auch als Giclée-Prints⁷⁴ bezeichnet.

7.3 Eigenschaften der Tinten

Tinten für den Tintendruck lassen sich grob unterteilen in Tinten mit löslichen Farbmitteln (wasser- oder lösungsmittelbasiert) und Tinten mit unlöslichen Farbmitteln (Pigmenttinten). Daneben gibt es noch Sonderformen, in denen harzummantelte Pigmente verwendet werden, die nach dem Auftreffen auf dem Trägermaterial polymerisieren⁷⁵.

Damit Tintentröpfchen in der gewünschten Größe entstehen, muss die Tinte eine bestimmte Viskosität und Oberflächenspannung⁷⁶ einhalten; beide Werte sind exakt auf den jeweiligen Druckkopf abzustimmen. Die Tinte soll auf dem Papier einen hohen Kontrast erzeugen; dieses setzt einen hohen Gehalt an gelöstem Farbstoff voraus, der jedoch bei tiefen Temperaturen nicht ausfällen darf. Außerdem muss der Farbstoff auf dem Papier möglichst lichtecht und wasserfest sein. Die Tinte muss unmittelbar nach dem Druck wischfest sein. Sie darf in Betriebspausen nicht eintrocknen und auch nicht die Komponenten des Tintensystems angreifen. Die Farbstoffe müssen ungiftig sein und dürfen auch keine karzinogenen⁷⁷ Stoffe enthalten. Da die Anforderungen an die Tinten je nach System sehr unterschiedlich sind, können Piezo-Tinten nicht in thermischen Druckern verwendet werden und umgekehrt.

Eine niedrige Oberflächenspannung der Tinte bewirkt ein schnelles, tiefes Eindringen aber auch ein stärkeres Verlaufen auf der Oberfläche des Mediums, das zudem noch von der Porosität des Papiers abhängig ist.

74 Giclée-Prints (frz. „das Gesprühte“): Geschütztes Markenzeichen für IRIS-Tintendrucke. Neben qualitativen Aspekten wie extrem hoher Auflösung, großem Detailreichtum und hoher Farbsättigung zeichnen sich Giclée Prints vor allem durch die Verwendung hochwertiger Aquarell- und Büttenpapiere aus. Die verwendeten Spezialtinten bieten eine sehr hohe Licht- und Alterungsbeständigkeit. Der Begriff wird mittlerweile häufig für jede Art digitalen Fine-Art-Druckens verwendet.

75 Zusammenschluss organischer Verbindungen ohne stoffliche Veränderung zu größeren Molekülen.

76 Grenzflächenspannung, die bei Flüssigkeiten an der Grenzfläche gegen den Gasraum wirkt und die Oberfläche zu verkleinern sucht. Diese verursacht z.B. die Kugelform kleiner Tropfen. Die Oberflächenspannung nimmt mit zunehmender Temperatur ab und wird stark durch in der Flüssigkeit gelöste Stoffe, z.B. Tenside, beeinflusst.

77 krebserzeugend

Durch Zusätze von adsorbierenden⁷⁸ Materialien (z.B. Kreide) und Bindemittel kann die Oberfläche von Papier und Folien so gestaltet werden, dass sich eine optimale Punktbildung ergibt. Dringt die Tinte tief in das Medium ein, werden Intensität und Brillanz der Farben geringer.

Zur Einstellung der wichtigsten Eigenschaften enthält eine Tinte etwa folgende Komponenten:

- Farbstoff (0,2 - 5 Gew.%) zur Farbgebung.
- Feuchthaltemittel (2 - 10 Gew.%) zur Verhinderung des Eintrocknens in den Tintenkanälen und Düsen.
- Konservierer (0,1 - 0,3 Gew.%) verhindert Schimmelbildung.
- Bindemittel/Verdickungsmittel (0 - 0,2 Gew.%) zum Einstellen des Fließverhaltens und zur Verbesserung der Haftung auf dem Druckmedium.
- Tenside (0 - 0,2 Gew.%) zur Verbesserung der Benetzung von Tinte führenden Bereichen und Medien.
- Biozid, das Pilz- und Bakterienwachstum verhindert.
- Lösemittel und/oder Wasser (ad. zu 100 %) zur Lösung von Zusatzstoffen und zur Beeinflussung des Fließverhaltens.

Grundsätzlich hängen die Ergebnisse eines Tintendrucks auch von der relativen Feuchte der Umgebung und der Umgebungstemperatur ab. Daher sollten Vergleichstests immer unter konstanten Bedingungen durchgeführt werden.

Je kleiner die Kanäle und Düsen sind, desto höhere Anforderungen werden an das Fließverhalten der Tinte gestellt. Bei unzureichendem Tintenfluss kommt es zur Verarmung beim Druck, d.h. zu fehlenden Linien. Die Tinten müssen frei sein von störenden Partikeln und sie dürfen keine Komponenten enthalten, die solche mit der Zeit bilden können - andernfalls können die Düsen verstopfen.

Das Langzeitverhalten einer Tinte und die Lebensdauer der Druckköpfe unterliegt verschiedenen Einflüssen. Neben der Tropfenqualität muss eine

⁷⁸ Adsorption: Anlagerung von Gasen oder gelösten Stoffen (Adsorbat) an der Oberfläche fester Körper (Adsorbens).

Tinte über die gesamte Lebensdauer eines Kopfes gute Ergebnisse liefern. Die Tinte kann in sich oder im Zusammenhang mit den Materialien der Köpfe instabil sein. An den Druckköpfen kann Korrosion auftreten, wenn der pH-Wert der Tinte ungeeignet ist, aber auch wenn Unverträglichkeiten mit den Tintenlösungsmitteln oder Zusatzstoffen auftreten.

Besondere Probleme kann das Schaummaterial erzeugen, das sich im Innern vieler Tintenpatronen befindet. Dieses stellt durch die Kapillarkwirkung der Poren sicher, dass die Tinte nicht aus dem offenen System ausläuft. Da die verschiedenen Bestandteile der Tinten unterschiedlich am Schaummaterial anhaften können, ändert sich in diesen Fällen während des Gebrauchs oder bei längerer Lagerung das Erscheinungsbild der Tinte. Mit diesem Problem haben gelegentlich Hersteller von *Fremdtinten* zu kämpfen, welche die Tintenpatronen nicht selbst herstellen. Dieses kann sich sehr störend beim Druck von Fotos – insbesondere bei Schwarzweißbildern – auswirken.

7.4 Tintenarten

Eine besondere Stärke der Tintendrucktechnologie ist ihre Vielseitigkeit. Es gibt eine Vielzahl von Tinten, mit Farbstoffen oder Pigmenten, die auf eine große Zahl von Trägermaterialien gedruckt werden können, z.B. auf normale und beschichtete Papiere, Karton, Filme, Leinwand, Vinyl, Stoff, Leder und noch vieles mehr.

Hochglänzende Tinten und Druckmedien besitzen eine wesentlich höhere Farbbrillanz und sorgen für *schönere* Bilder. Tinten für den hochglänzenden Druck sind oft UV-empfindlich und bleichen nach kurzer Zeit aus. Die folgende Unterteilung ist problematisch, da Tinten sowohl nach dem Einsatzgebiet als auch nach ihrer Zusammensetzung klassifiziert werden können.

Wegen des unterschiedlichen Drucksystems sind bestimmte Drucker entweder für Farbstoff- oder für pigmentierte Tinten geeignet. Eine Umrüstung ist nur für die Maschinen des *Large-Format-Bereiches*⁷⁹ vorgesehen. Auch die Anforderungen an die Papiere sind verschieden. Für optimale Ergebnisse gibt es Papiere für Farbstofftinten und für pigmentierte Tinten.

79 Large Format Printer (Großformatdrucker) sind Geräte zum Drucken großformatiger Motive. Es werden überwiegend Tintenstrahldrucker mit Druckbreiten zwischen 1,3m und 5m eingesetzt.

Abbildung 7.5 zeigt einen Vergleich der Farbräume von Farbstoff- und Pigmenttinten, gedruckt auf derselben Papiersorte.

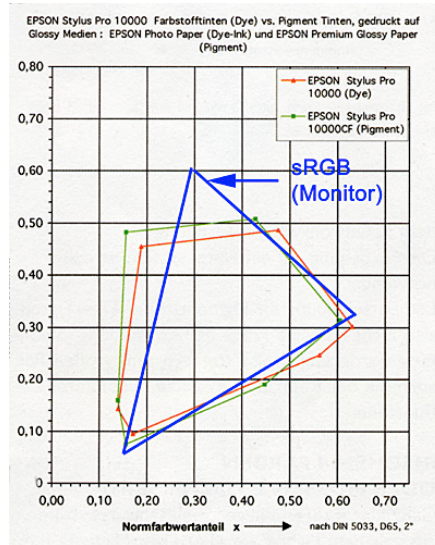


Abb. 7.5: Vergleich Farbstofftinten mit Pigmenttinten

7.4.1 Farbstofftinten

Farbstofftinten (engl.: dye ink) basieren auf gelösten Farbstoffen. Daher sind diese Tinten nicht wasserfest. Sie sollen in das Papier eindringen, ohne dabei seitlich zu verlaufen. Es gibt Varianten mit einer erhöhten Lichtbeständigkeit, die sich besonders für den hochwertigen Bilderdruck eignen. Der Farbraum⁸⁰ der farbstoffbasierten Tinten ist groß; auf den entsprechenden Medien gedruckt ergibt sich nahezu ein fotorealistischer Eindruck. Farbstofftinten werden fast ausschließlich im Innenbereich eingesetzt (*Indoor*-Tinten).

⁸⁰ Bereich der Farbwiedergabe. Siehe auch Kapitel 5.

7.4.2 Pigmenttinten

Für Außenanwendungen werden fast ausschließlich Pigmenttinten eingesetzt, die sich durch eine hohe UV-Beständigkeit und Wasserfestigkeit auszeichnen. Diese Tinten haften an der Oberfläche des Papiers bzw. dringen nur wenig ein. Für einen kurzzeitigen Außeneinsatz kann auf eine Laminierung⁸¹ verzichtet werden. Spezielle Kombinationen von Tinte, Medium und Laminat ergeben Haltbarkeiten von mehreren Jahren. Es tritt häufig ein Metamerie-Effekt⁸² auf. Außerdem kann es auf Papieren mit einer glänzenden Oberfläche zu matter erscheinenden Stellen kommen, wenn der Gesamtfarbaufrag sehr hoch ist.

Bei hochwertigen Tinten werden die Pigmentpartikel mit einem besonderen Harz ummantelt. Beim Auftreffen auf das Druckmedium erfolgt eine Fixierung durch Polymerisierung. Die harmonisierte Form und Größe der Partikel sowie der Film aus polymerisiertem Harz führen zu einer Verringerung der Lichtstreuung und damit zu einer besseren Bildqualität auf entsprechenden Druckmedien⁸³.

7.4.3 Wachstinten

Diese Tinten⁸⁴ besitzen Eigenschaften, welche sie von Flüssigtinten unterscheiden. Die Druckköpfe sind ähnlich aufgebaut, aber die Tinten sind bei Raumtemperatur fest. Sie werden zuerst geschmolzen. Das heiße Tröpfchen wird überwiegend durch Piezo-Wandler ausgestoßen. Beim Auftreffen auf den Träger wird es sofort fest. Da kein Wasser auf dem Träger trocknen muss, kann schneller als mit Flüssigtinten gedruckt werden. Allerdings sind die Drucker wesentlich teurer und werden überwiegend für professionelle Anwendungen eingesetzt, z.B. für die Produktion von Displays, Postern und Proofdrucken⁸⁵.

81 Laminieren: Verfahren zur Druckveredelung und zum Schutz von Drucksachen. Dabei wird eine Schutzfolie auf eine fotografische oder gedruckte Vorlage aufgezogen. Die Folie schützt die Vorlage gegen UV-Strahlung, gegen Schmutz oder gegen Beschädigung.

82 Metamerie: Phänomen, das bei zwei Farbproben auftritt, wenn diese bei einer oder mehreren Lichtarten übereinstimmen, bei anderen Lichtarten aber farblich voneinander abweichen. Siehe auch: https://de.wikipedia.org/wiki/Metamerie_%28Farblehre%29

83 <http://www.photoscala.de/Artikel/UltraChrome-K3-Tintentechnologie-von-Epson>

84 <http://de.wikipedia.org/wiki/Festtintendrucker>

85 http://de.wikipedia.org/wiki/Proof_%28Druck%29

Wachstinten sind vom Trägermaterial unabhängiger als Flüssigtinten. Sie dringen kaum in das Medium ein. Mit einer Drucknachbehandlung werden die Wachspunkte zusätzlich fixiert. Als Farbmittel dienen Pigmente oder Farbstoffe. Die Lichtstabilität ist ähnlich der von herkömmlichen Tintenmaterialien, die Bilder sind aber empfindlich gegen Kratzer und Oberflächenverletzung und verlaufen unter dem Einfluss höherer Temperaturen.

7.4.4 Tinten für Schwarzweißdrucke

Mit den üblichen Farbdruckern lassen sich Schwarzweißdrucke im schwarzweißen Druckmodus oder im Farbmodus erzeugen. Im ersten Fall verwendet der Drucker nur schwarze Tinte. Hierbei erhält man ansprechende Ergebnisse, wenn der Drucker mit einer Auflösung von > 2.500 dpi arbeitet. Im Farbmodus mischt der Druckertreiber die unterschiedlichen Graustufen aus den cyan-, magenta- und gelbfarbenen Tinten. Leider hat diese Methode den Nachteil, dass durch unzureichende Farbbalance Farbstiche entstehen können, die vom Grauwert abhängig sind.

Abhilfe schaffen hier spezielle Tintenkombinationen, diese enthalten monochrome Tinten in unterschiedlichen Intensitäten (z.B. hellgrau, mittelgrau, und schwarz). Die hellgrauen Druckpunkte sind auf dem Papier kaum sichtbar, wodurch die Drucke einen wesentlich angenehmeren Eindruck erzeugen als bei einem normalen Druck mit schwarzer Tinte. Der Bildton ist – wie bei klassischen Fotopapieren – selten wirklich neutral, sondern tendiert unterschiedlich stark zu warmen oder kalten Farbtönen. Schwarze Pigmente und Farbstoffe sind in der Regel erheblich haltbarer als die farbigen. Vor allem aber sind es die sehr guten Tonwertabstufungen, die für die Verwendung dieser Tintensets sprechen.

Der Benutzer hat die Möglichkeit, die verschiedensten Fine-Art-Papiere zu verwenden, und er wird belohnt durch Drucke mit einer ungewohnten und sehr ästhetischen Anmutung. Die Drucke haben eine hohe Alterungsbeständigkeit. Trotzdem sollten sie ähnlich sorgfältig behandelt und aufbewahrt werden wie wertvolle Fotoabzüge⁸⁶.

86 Siehe auch Fußnote 84

7.4.5 Textiltinten

Für den Textildruck⁸⁷ ist die Wahl der richtigen Tinte von entscheidender Bedeutung. Bei den angebotenen Systemen unterscheidet man zwischen Reaktiv- und Sublimationstinten. Beim Bedrucken von Naturfasern (z.B. Baumwolle) kommt reaktive Tinte zum Einsatz. Das Material muss dafür vorbehandelt werden, da sonst die Farben ausbleichen. Mischfasern (z.B. Seide/Leinengewebe) bedruckt man mit gesäuerten Tinten. Diese verbinden sich mit der Faser und lassen sich durch heißen Wasserdampf fixieren. Beim Druck auf Kunstfasern (z.B. T-Shirts) kommen Dispersionsfarben zum Einsatz, die man heiß fixieren muss. Der Vorgang verschmilzt die Tinte mit der Faser. Bei den Sublimationstinten erfolgt der Druck normalerweise auf ein Transferpapier. Unter einer Heizpresse wandert die Farbe vom Papier in den Stoff und wird fixiert.

7.4.6 Alternative Tinten

Es gibt im wesentlichen zwei Beweggründe für den Einsatz alternativer Tinten von Drittanbietern: Kostenersparnis und die Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten.

Druckerhersteller raten aus verständlichen Gründen von der Verwendung fremder Tinten ab und drohen mit dem Verlust der Garantie. Die Furcht, den Drucker zu beschädigen, ist im allgemeinen unbegründet.

Die Druckqualität kann schon problematischer sein. Oft entspricht der Farbraum der neuen Tinten nicht dem der Original-Tinte. Auch bei den Medien kann es zu Inkompatibilitäten kommen. Wenn sich beispielsweise die Tinte nicht mit der Beschichtung verträgt, kann es vorkommen, dass der Druck nach mehreren Tagen noch nicht trocken ist. Um dieses zu vermeiden, stellen die Tintenhersteller manchmal Kompatibilitätstabellen zu Verfügung.

7.5 Farbunterschiede beim Tintendruck

Farbunterschiede beim Tintendruck haben in der Regel zwei Ursachen: die Verwendung von Tinten eines anderen Herstellers und/oder die Verwendung von anderen Druckmedien. Die besten Ergebnisse wird man im

87 <http://www.printsolution.de/index.dml?unten=glossar/Tintenarten.htm&von=html>

Allgemeinen mit den vom Druckerhersteller empfohlenen Materialien erzielen – allerdings sind dann auch die Materialkosten am höchsten.

Den größten Einfluss auf die Farbgebung hat die Tinte. Der Einfluss des Druckmediums ist normalerweise nicht so extrem ausgeprägt, in vielen Fällen jedoch deutlich sichtbar. Die Tinten eines Herstellers unterliegen im Allgemeinen nur geringen Fertigungsschwankungen im Farbstoffgehalt und hinsichtlich der anderen Komponenten. Bei Verwendung von Tinten unterschiedlicher Hersteller können jedoch eklatante Unterschiede im Druckergebnis auftreten. Fremdherstellern ist die 100 %ige Kopie einer Tinte patentrechtlich nicht erlaubt. Außerdem kann häufig die genaue Originalrezeptur nicht analysiert werden.

Im professionellen Bereich wird man beim Wechsel des Tinten- oder Papierherstellers neue ICC-Profile⁸⁸ erstellen oder erstellen lassen. Beim Druck auf Fine-Art-Papieren (siehe Kapitel 7.6.3) mit Tinten besonders hoher Lichtbeständigkeit wird man ohne spezielle ICC-Profile oder Druckertreibereinstellungen kaum akzeptable Ergebnisse erzielen. Manche Dienstleister⁸⁹ und Hersteller spezieller Tinten und/oder Papiere⁹⁰ bieten dafür einen speziellen Service an. Geringe Farbunterschiede bei der Verwendung von Materialien verschiedener Hersteller lassen sich trotzdem nicht vermeiden, da die Farbräume immer etwas unterschiedlich sind.

7.6 Papiere für den Tintendruck

Die Realisierung der heute möglichen hohen Druckqualität, insbesondere für *fotorealistische* Bilder, erfordert hochwertige Papiere. Hersteller von Tintendruckern bieten daher spezielle Papiere an, die – nach eigener Aussage – die einzig optimalen Papiere für ihre Drucker sind. Grundsätzlich ist es richtig, zunächst mit den vom Druckerhersteller angebotenen oder empfohlenen Materialien zu beginnen; damit erhält man mit hoher Wahrscheinlichkeit gute Ergebnisse und hat damit einen Standard zum Vergleich mit anderen Papieren.

88 ICC-Profil, ICC-Farbprofil: In einem Datensatz erfasste Farbeigenschaften eines Eingabe-, Anzeige- oder Ausgabegerätes, die von einem Farbmanagementsystem genutzt werden, um die Farbtreue über die gesamte Verarbeitungskette hinweg zu gewährleisten. Siehe Kapitel 5.10

89 z.B. <http://www.icc-profileservice.de/>

90 z.B. <http://www.hahnemuehle.com/de/digital-fineart/icc-profile.html>

Bei Experimenten mit Materialien von Fremdherstellern wird empfohlen, zunächst entweder nur die Tinte oder das Papier zu wechseln, da sonst die Ursache für Farbabweichungen nicht bekannt ist. Im Allgemeinen tragen die Fremdtinten stärker zu Abweichungen in der Farbwiedergabe bei.

Optimale Ergebnisse sind nur in der richtigen Abstimmung aller Elemente (Drucker, Druckfarbe und Papier) zu erreichen. Stellen Sie mit den Originaltinten und -papieren einige Referenzdrucke verschiedener Motive her, mit denen Sie die mit den Fremdmaterialien erzielten Ergebnisse vergleichen. Beim Prüfen können Sie Farbwiedergabe und -auftrag, die Lichter- und Schattenzeichnung, die Grauwiedergabe, das Verlaufen der Farben, den Oberflächeneindruck und die Trocknung testen. Erproben Sie die unterschiedlichen Papiergewichte für Ihre Anwendungen.

Manche Hersteller bieten zum Testen Probepackungen mit verschiedenen, spezialbeschichteten Papieren an. So kann man feststellen, welches Druckmedium für die individuelle Anwendung am besten geeignet ist.

Papiere für den Tintendruck werden unter den verschiedensten Bezeichnungen angeboten, auf die hier nicht eingegangen werden kann. In den folgenden Abschnitten sollen nur die wesentlichen Merkmale der für den Tintendruck geeigneten Papiere beschrieben werden.

7.6.1 Normalpapier

Mit *Normalpapier* sind hier nicht die üblichen Papiere für den Bürobe-
darf gemeint. Diese Papiere (80-90 g/m² im Format DIN A4) sind sehr un-
gleichmäßig und raufaserig, so dass die Tinte stark verläuft, da diese nicht
schnell genug trocknen kann – die Farbflächen fließen ineinander, sie *blu-*
ten aus. Da Tintendrucker nur runde Punkte drucken können (ideal wären
quadratische), arbeitet man mit dem Trick der Überfüllung – alle Drucker-
punkte sind größer als das Druckraster. Dieses ermöglicht zwar einen flä-
chigen Farbauftrag, stellt aber das Papier auf eine harte Belastungsprobe –
der Tintenüberschuss muss vom Papier aufgenommen werden. Das Materi-
al wellt sich, wenn es die hohen Tintenmengen der Fotos nicht aufnehmen
kann. Auch die mit dem Vermerk *geeignet für Inkjet-Drucker* bezeichneten
Papiere sind häufig nur für Textausdrucke brauchbar.

Die *normalen* Papiere für den farbigen Tintendruck sind so konzipiert, dass der Drucker mit Hilfe der Tinten randscharfe und möglichst farbtreue Ausdrücke erzeugt. Die Tinte soll auf dem Papier möglichst schnell trocknen und die Papiere dürfen sich bei vollflächigem Farbauftrag nicht wellen. Textdruck muss randscharf sein und Bilder und Fotos müssen trotz matter Oberfläche in guter Qualität gedruckt werden.

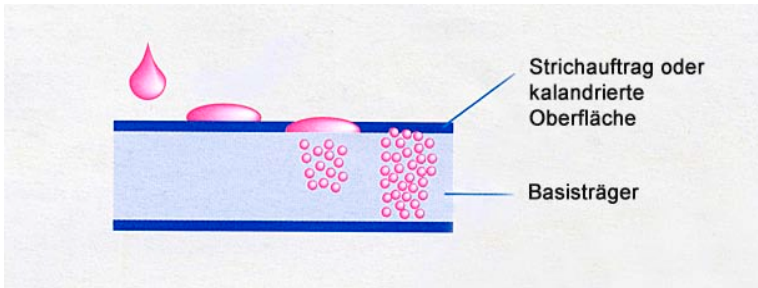


Abb. 7.6: Normal beschichtetes Papier (Quelle: Tetenal)

Normale Papiere für den Tintendruck besitzen entweder einen Strichauftrag⁹¹ oder eine kalandrierte⁹² Oberfläche (Abbildung 7.6). Diese Oberfläche ermöglicht eine erste Tintenaufnahme. Im einfachen Basisträger sickert die Farbe aber diffus in das Papier. Dadurch sind Brillanz und Punktschärfe geringer als bei Spezialpapieren.

7.6.2 Spezialpapiere

Bei Grafiken und fotorealistischen Ausdrücken muss das Papier oft die sechs- bis achtfache Tintenmenge aufnehmen wie beim Textdruck. Nur hochwertige Spezialpapiere sind in der Lage, die Tinten so aufzunehmen, dass sämtliche Druckerpunkte konturenscharf auf trocknen.

Eine Schutz- und Empfangsschicht ermöglicht eine schnelle und gleichmäßige Tintenaufnahme. Sie erhöht die Wischfestigkeit und verringert das Ausbleichen der Farbe (Abbildung 7.7). In der Kapillarschicht

91 Gestrichene Papiere: Papiere, die zur Verbesserung der Oberflächenglätte, des Glanzes, der Weiße und der Bedruckbarkeit einen „Strich“ aufweisen. Die Streichmasse besteht aus natürlichen Pigmenten, Bindemittel und diversen Hilfsstoffen.

92 Kalandrieren: Maschine zum Glätten (Satinieren) von Papier

verdunstet die Flüssigkeit der Tinte und zurück bleibt ein konturenscharfer Farbpunkt.

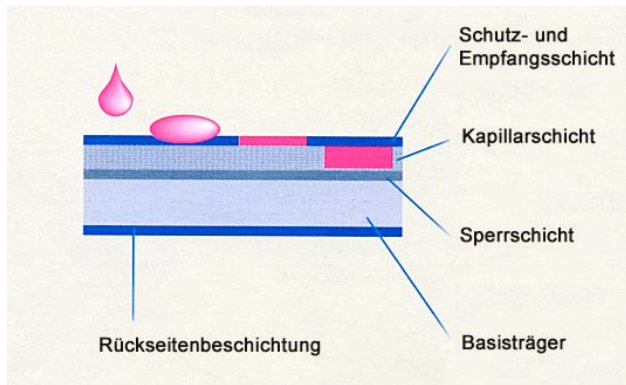


Abb. 7.7: Spezielles Papier für den Tintendruck (Quelle: Tetenal)

Die Trocknungszeit wird verkürzt und die Lichtbeständigkeit erhöht. Die Sperrschicht verhindert das weitere Eindringen der Tinte in den Papierträger. Dadurch wird eine gleichmäßige Farbsättigung und eine gleichbleibend hohe Farbtintensität ermöglicht. Der Basisträger kann in Stärke, Glätte, Gewicht und Stoffzusammensetzung variiert werden und bestimmt damit wesentlich die Eignung des Papiers für bestimmte Zwecke. Durch die Rückseitenbeschichtung wird eine gute Planlage gewährleistet.

7.6.3 FineArt-Papiere

*FineArt-Papiere*⁹³ sind hochwertige Papiere für Digitaldrucke, deren Erscheinungsbild und Oberfläche eine hohe Qualität erfordern. Die Papiere sind zu 100 % säurefrei und haben einen neutralen pH-Wert, so dass sie über sehr lange Zeit extrem alterungsbeständig sind.

93 http://www.digitalkamera.de/Meldung/Grundlagen_Fotopapiere_Teil_2_Fine-Art-Papiere/4116.aspx

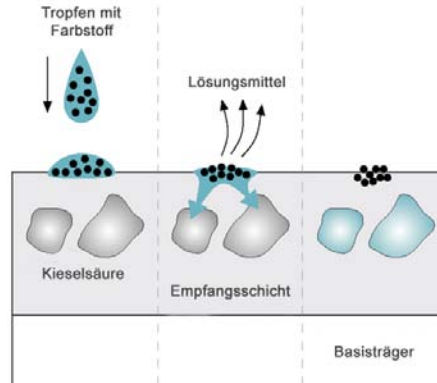


Abb.: 7.8: Schichtaufbau der FineArt-Papiere

Abbildung 7.8 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines FineArt-Papiers. Die auftreffenden Tintentropfen geben ihr Wasser an die Kieselsäure-Kristalle der Empfangsschicht ab: das Lösungsmittel verdunstet. Die Farbstoffe werden in der Oberfläche chemisch gebunden und ergeben so ein konturenscharfes Bild mit hoher Farbsättigung. Das Medium besitzt eine kurze Trockenzeit.

Fine Art-Papiere werden auch unbeschichtet geliefert. Bei diesem Medium sinkt die Farbe in den Papierträger etwas ein und erzeugt so bei vielen Motiven eine aquarellartige Anmutung. Die Alterungsbeständigkeit dieser Papiere ist – in Verbindung mit geeigneten Tinten – besonders hoch.

7.6.4 Digitale Bilder auf Fotopapier

Trotz aller Fortschritte bei der fotorealistischen Qualität von Tintendruckern, besitzt ein Fotoabzug auf *konventionellem Fotopapier* einige Vorzüge. Die Beständigkeit der Bilder liegt heute noch über der normaler Tintendrucke mit Farbstofftinten, außerdem besitzen Fotoabzüge kein sichtbares Druckraster.

Bei Fotobelichtungen aus Bild-Dateien handelt es sich um echte Papierabzüge auf Fotopapier. Die Drucke werden in digitalen Fotolabors hergestellt, die als Daten eine Datei in einem der üblichen Bildformate (z.B. JPEG oder TIFF) verwenden. Datenträger sind z.B. Disketten, CD-ROMs oder Speicherkarten. Negative oder Dias können digitalisiert werden. Die

Bilder werden meist in einer Belichtungsauflösung von etwa 300 dpi ausgegeben. Dieser Wert ist vergleichbar mit der Druckauflösung von Thermosublimationsdruckern⁹⁴.

7.7 Beständigkeit der Drucke

Digital gespeicherte Bilder und Dokumente können auf *Bildschirmen* wieder dargestellt werden, solange die entsprechende Hard- und Software noch zur Verfügung steht. Für den täglichen Umgang, die Präsentation an der Wand oder auch für die Archivierung werden *Ausdrucke* bevorzugt. Damit ergibt sich die Frage, wie es mit der Haltbarkeit dieser Medien steht.

Es gibt kein Material welches die Zerstörung unserer Bilder verhindern kann. Durch die Auswahl entsprechender Tinten und Papiere sowie der Bedingungen für Präsentation und Archivierung lässt sich jedoch der Alterungs- bzw. Zerstörungsprozess verlangsamen oder auch extrem beschleunigen.

Die klassischen Medien Druck und Fotografie sind in ihrer Haltbarkeit bekannt und es gibt Normen und Vorschläge für ihre Aufbewahrung. Die Einflüsse, die zu ihrem Zerfall führen sind seit Jahren gründlich untersucht worden. Die Werte können als Standard und zum Vergleich mit den neuen Medien verwendet werden. Bei klassischen Fotos – wenn sie vorschriftsmäßig fixiert, gewässert und aufbewahrt werden – ist die Archivbeständigkeit überwiegend eine Sache des Papiers⁹⁵.

Bei Tintendruckern muss immer die *Kombination* Papier, Beschichtung und Tinte berücksichtigt werden. Je weniger Chemikalien in diesen drei Komponenten verwendet werden, desto geringer ist die Gefahr, dass diese untereinander oder mit Stoffen aus der Umgebung reagieren und die Haltbarkeit des Druckes herabsetzen.

Mit Tintendruckern hergestellte Bilder können bereits nach wenigen Tagen erste Farbveränderungen zeigen, es kann aber auch viele Jahre dauern. Ein wesentlicher äußerer Einflussfaktor ist die einwirkende Lichtmen-

94 Druckverfahren, das echte Fotoqualität liefert. Die Farbpunkte werden durch Heizelemente von einem Farbband oder einer Trägerfolie abgelöst und auf eine Empfangsschicht aus Papier oder Folie übertragen. Die einzelnen Bildpunkte werden dabei ohne Zwischenraum aneinandergefügt. Siehe auch <https://de.wikipedia.org/wiki/Thermosublimationsdruck>

95 Faustregeln für die Fotoarchivierung. Ein Leitfaden von W. Hesse, M. Schmidt, S. Dobrusskin und K. Pollmeier. Sonderheft 1 der Zeitschrift „Rundbrief Fotografie“, 1997

ge, also das Produkt aus Beleuchtungsstärke und der Zeit. Dabei wird der ultravioletten Komponente eine besondere Wirksamkeit nachgesagt. Nach eigenen Erkenntnissen scheint deren Einfluss auf den Träger (Vergilben des Papiers) manchmal stärker zu sein als der auf die Beständigkeit der Farbstoffe.

Für den Tintendruck verwendete Papiere besitzen häufig einen hohen Gehalt an optischen Aufhellern⁹⁶. Diese sind Zusatzstoffe, die den ultravioletten Anteil des Lichtes in längerwelliges Licht umsetzen. Das hat den Effekt, dass das Papier weißer, strahlender aber auch bläulicher wirkt, da zu den im sichtbaren Licht reflektierten Wellenlängen die aus dem UV-Spektrum verwandelten Wellenlängen zusätzlich hinzu kommen. Von diesen *Weißmachern* ist bekannt, dass sie mit, aber auch ohne Lichteinwirkung, in relativ wenigen Jahren gelbstichig werden. Daher können Papiere mit viel optischen Aufhellern nicht dauerhaft farbstabil und damit alterungsbeständig sein.

Ein anderer Aspekt bedarf dringend weiterer Untersuchungen: die Beständigkeit gegen Gase, z.B. gegen Ozon oder der Ausdünstungen von Lacken. Es wurde beispielsweise festgestellt, dass Bilder mit sehr hoher Lichtbeständigkeit nicht *IKEA-fest* waren: Einige Wochen Lagerung auf einem frisch erworbenen Büroregal führten zu katastrophalen Veränderungen der Bilder.

Wegen der Vielzahl der Kombinationen von Tinten und Medien ist es schwer, generelle Aussagen über die Haltbarkeit von Tintenbildern zu machen. Pigmenttinten haben in der Regel eine höhere Lichtbeständigkeit als solche auf Farbstoffbasis – zusätzlich sind sie weitgehend wasserfest. Diese Vorteile erkaufte man sich allerdings bei manchen Tinten mit einem kleineren Farbraum. Grundsätzlich sollte man bei allen Tests die Kombination aus Tinte, Medium und ggf. Laminat betrachten, da die Beständigkeit der Tinte allein noch keine konkrete Aussage zulässt.

7.8 Bestimmung der Lichtbeständigkeit

Neben der Beständigkeit gegen hohe Raumtemperatur, Feuchtigkeit und Chemikalien ist die Lichtbeständigkeit oder Lichtechtheit eine besonders wünschenswerte Eigenschaft von Tintendruckern. Darunter versteht

96 http://de.wikipedia.org/wiki/Optische_Aufheller

man die Beständigkeit gegenüber der Einwirkung von Licht sowie Strahlung im UV-Bereich. Dabei werden photochemische Prozesse ausgelöst, die zu Farbveränderungen oder Ausbleichen führen. Feuchtigkeit kann in diesem Zusammenhang einen katalysatorischen⁹⁷ Effekt besitzen.

Tests zur Lichtbeständigkeit sind unter standardisierten Bedingungen durchzuführen. Die spektrale Zusammensetzung des Lichtes und die einwirkende Strahlungsmenge müssen bekannt sein. Da die Veränderungen der Drucke durch die genannten Einflüsse i.a. nur langsam erfolgen, sind zeitraffende Verfahren erwünscht. Leider lassen sich deren Ergebnisse nur sehr bedingt auf Drucke übertragen, die in üblichen Wohn- oder Geschäftsräumen aufgehängt oder die archiviert werden.

7.8.1 Die konventionelle Prüfung der Lichtechtheit

Als Maßstab für die Lichtechtheit dient bei *normgerechten* Prüfungen die *Wollskala*⁹⁸. Die Wollskala basiert auf der Eigenschaft verschiedener Farbstoffe, unter Sonneneinstrahlung unterschiedlich schnell auszubleichen. Sie ist ein wichtiges Klassifikationsinstrument aus der Textilindustrie das vor allem in der Druckindustrie zur Bewertung der Lichtechtheit von gedruckten Plakaten, Etiketten u.s.w. zum Einsatz kommt.

Die Wollskala besteht aus einer Skala von acht blauen, in ihrer Lichtechtheit abgestuften Typfärbungen auf Wollgewebe, die zusammen mit den Proben in einem Prüfgerät der Bestrahlung ausgesetzt werden. Die Lichtechtheit dieser Typfärbungen ist so gestuft, dass ein Übergang zur jeweils höheren Stufe etwa einer Verdopplung der erforderlichen Bestrahlungszeit entspricht. Als Lichtechtheitsnote der Probe gibt man die Zahl derjenigen Type der Wollskala an, welche sich gleichzeitig mit der Probe im Vergleich zu einem bei der Bestrahlung abgedeckten Teil *deutlich* (gilt bis Stufe 6), bzw. *gerade erkennbar* (gilt bei den Stufen 7 und 8) verändert hat.

Als Hilfe bei der Einstufung dient ein neutraler Graustufenkeil. Die normgerechte Prüfung mit Xenon-Bogenlicht ist in DIN/ISO 12040 beschrieben. Es werden spezielle Prüfgeräte eingesetzt, deren Prüfraum klimatisierbar ist.

97 Katalysator: Stoff, der durch Bildung aktiver Zwischenprodukte eine chemische Reaktion ermöglicht, beschleunigt oder in eine bestimmte Richtung lenkt.

98 <http://de.wikipedia.org/wiki/Wollskala>

| Stufe der Wollskala | Beurteilung der Lichteinheit | Entspricht einer Belichtungszeit in Mitteleuropa von | Produktanforderungen |
|---------------------|------------------------------|--|--|
| 1 | sehr gering | 5 Tagen | Unzureichend, sichtbare Veränderungen schon nach wenigen Tagen |
| 2 | gering | 10 Tagen | |
| 3 | mäßig | 20 Tagen | Ausreichend für Entwürfe und den privaten Bereich |
| 4 | ziemlich gut | 40 Tagen | |
| 5 | gut | 80 Tagen | Ausreichend für Aushänge in Innenräumen |
| 6 | sehr gut | 160 Tagen | |
| 7 | vorzüglich | 350 Tagen | Ausreichend für Außenplakate |
| 8 | hervorragend | 700 Tagen | |

Tabelle 7.1: Lichteinheitstufen

Für den Anwender interessant ist der Zusammenhang zwischen der Lichteinheitstufe und der Beanspruchungsdauer für Freilichtbedingungen und bei Innenräumen. Die Freilichtdauer ist wesentlich von der Jahreszeit und der geografischen Lage abhängig. In Tabelle 7.1 wird die Zuordnung der Lichteinheitstufen unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Freilichtdauer in Deutschland dargestellt. Leider lässt sich aus den Stufen keine Angabe darüber ableiten, wie lange ein Druck z.B. unter Innenraumbedingungen beständig ist. Um derartige Prüfverfahren bemüht sich Henry Wilhelm in den USA.

7.8.2 Die Prüfung der Lichteinheit nach Henry Wilhelm

Beim Prüfverfahren von Henry Wilhelm⁹⁹ werden die Testergebnisse auf Standard-Innenraumbedingungen umgerechnet: Tägliche Bestrahlung über 12 Stunden mit dem durch Glas gefilterten Licht einer Glühlampe

oder einer Leuchtstoffröhre bei einer Beleuchtungsstärke von 450 Lux¹⁰⁰. Die Temperatur beträgt 24°C bei einer Luftfeuchte von 60%. Als Grenze für die Lebensdauer wird das erkennbare Ausbleichen des Bildes, eine Veränderung der Farbbalance oder das Auftreten von Flecken verwendet.

Diese Prüfung ist durchaus praxisnah, da sich die Beleuchtungsbedingungen beim Test und beim Gebrauch der Bilder nicht sehr unterscheiden. Allerdings wird gelegentlich kritisiert, dass die verwendeten Grenzen für die Veränderung der Farbdichten nicht den Werten entspricht, die durch das menschliche Auge gesetzt werden.

Auf der Website werden Listen über die Lebensdauer vieler Tinten/Papier-Kombinationen für die unterschiedlichsten Drucker-Fabrikate veröffentlicht. Leider ist es nicht möglich, die Ergebnisse des mit der Wollskala arbeitenden Verfahrens und die Testergebnisse von Wilhelm-Research miteinander in Beziehung zu bringen bzw. ineinander umzurechnen.

7.8.3 Sonstige Prüfverfahren

Da die oben beschriebenen Verfahren zeitaufwendig und teuer sind, wird häufig versucht, mit Schnellverfahren zu aussagekräftigen Ergebnissen zu kommen. Beispielsweise testet eine bekannte Fotozeitschrift die bedruckten Papiere 100 Stunden lang unter dem Licht einer Quecksilber-Metaldampflampe mit 20.000 Lux. Anschließend wird der Farbverlust im Lab-Farbraum bestimmt. Damit lassen sich verschiedene Tinten/Papier-Kombinationen schnell vergleichen. Eine Umrechnung auf „normale“ Umgebungsbedingungen ist problematisch, da durch die hohe Beleuchtungsstärke Effekte entstehen können, die unter üblichen Raumbedingungen nicht auftreten.

Der Farbverlust wird heute überwiegend als Farbabweichung ΔE im Lab - Farbraum definiert (Abbildungen 5.14 und 5.15). ΔL ist dabei die Differenz auf der Helligkeitsachse, Δa die Differenz auf der Rot-/Grünachse und Δb die Differenz auf der Gelb-/Blauachse. Alle drei Einflüsse lassen sich in einem Zahlenwert ΔE_{ab} zusammenfassen:

100 Für Bilder-Ausstellungen ist dieser Wert i. Allg. zu hoch. Siehe: http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/lichtwissen18_Gutes_Licht_fuer_Museen_Galerien_Ausstellungen.pdf

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$$

- $\Delta E = 1$ Die vom menschlichen Auge gerade noch wahrnehmbare Farbdifferenz zweier Farben (kann nur von einem geübten Fachmann wahrgenommen werden).
- $\Delta E < 2,5$ Für einen Laien sind Farben mit diesem Farbabstand gleich.
- $\Delta E = 6...7$ Gilt als tolerierbar.
- $\Delta E > 10$ Die Unterschiede sind so groß, dass z.B. Reproduktionen nicht als gelungen gelten.

7.8.4 Vergleichende Untersuchungen

Für eigene Zwecke wurden einige vergleichende Untersuchungen an Tinten/Papier-Kombinationen durchgeführt, die mit den EPSON-Druckern Stylus Photo 2100 und 1290 bedruckt wurden. Diese Drucker sind heute nicht mehr aktuell, die Untersuchungen weisen jedoch auf einige Probleme hin. Die Testdrucke auf einem hochwertigen, glänzenden Papier wurden hinter einem Fenster mit Isolierverglasung in Südlage 25 Wochen lang dem Tageslicht ausgesetzt.

| Farbe | Ultra Chrome™-Tinte EPSON Stylus Photo 2100 (Pigmenttinte) | Originaltinte EPSON Stylus Photo 1290 | Fremdhersteller EPSON Stylus Photo 1290 |
|---------|--|---|---|
| Cyan | 1 | 3,4 | 6,8 |
| Yellow | 1,8 | 7 | 50,4 |
| Magenta | 2,6 | 17 | 22,3 |

Tabelle 7.2: Relativer Farbverlust verschiedener Tinten auf glänzendem Fotopapier

Die Bestimmung des Farbverlustes ΔE_{ab} erfolgte mit einem Messgerät X-Rite SP62. Es wurden zunächst die EPSON-Originaltinten der Drucker 2100 und 1290 miteinander und diese dann mit einer preiswerten Tinte eines Fremdherstellers verglichen. Es zeigte sich, dass die *pigmentierte* UltraChrome™-Tinte des Druckers 2100 die beste Lichtbeständigkeit der drei Testkandidaten besitzt (Ob die vom Hersteller vorhergesagte Lichtbeständigkeit von 75 Jahren zutrifft, wird heute wohl niemand nachweisen

können). Die stabilste Druckfarbe der UltraChrome™-Tinte ist das Cyan, dessen relative Beständigkeit in der folgenden Tabelle gleich eins gesetzt wurde.

Die Tabelle zeigt, dass bei der UltraChrome™-Tinte die Farbe Magenta die Komponente mit der geringsten Lichtbeständigkeit ist. Die UltraChrome™-Tinte ist (je nach Farbe) um den Faktor 3,4 bis 6,5 lichtbeständiger als die Originaltinte des EPSON Stylus Photo 1290. Die Drucke mit der Tinte des Fremdherstellers lassen sich über längere Zeit nur im Dunkeln lagern.

In einem zweiten – über 11 Wochen laufenden Test – wurden Drucke auf dem oben verwendeten glänzenden Papier mit solchen verglichen, die auf einem matten Fine-Art-Papier erfolgten. Beide Papiere stammen von bekannten Herstellern. Dabei ergaben sich folgende Werte:

| | Glänzendes Papier | Mattes FineArt- Papier |
|---|----------------------|---------------------------|
| Relativer Farbverlust (abhängig vom Farbton) | 1 | 3 bis 5,5 |

Tabelle 7.3: Vergleich des relativen Farbverlustes bei glänzendem und mattem Papier

Diese Werte lassen sich nicht verallgemeinern; sie zeigen aber, dass bei dem komplexen Thema der Langzeitbeständigkeit noch viele Fragen offen sind. Abschließend sei angemerkt, dass beim verwendeten Fine-Art-Papier häufig auf die hohe Beständigkeit des Papiers hingewiesen wird. Dabei kann aber nur der Papierträger gemeint sein. Die schlechten Testergebnisse nach Tabelle 7.3 sind wahrscheinlich durch den hohen Gehalt an optischen Aufhellern begründet, denn der Hersteller kündigte an, eine Variante ohne optische Aufheller auf den Markt zu bringen.

8. Glossar

Auf den Gebieten Informations-Technik, Digitalfotografie, Bildbearbeitung, Archivierung usw. trifft man auf eine Vielzahl von Begriffen, die sich dem Leser nicht unmittelbar erschließen. In einem *Glossar zum digitalen Bild*¹⁰¹ wurde versucht, die wichtigsten Begriffe kurz zu erläutern.

9. Quellen

Agfa-Gevaert-Schriftenreihe: Einführung in die digitale Bildbearbeitung / Eine Einführung in die digitale Farbe.

Daly, Tim: Handbuch digitale Photographie. Evergreen Verlag Köln, 2000.

Dilling, Manfred: Der Übergabestandard. digit! 6-02, S. 18.

ECI-Guidelines for device-independent color data processing in accordance with the ICCStandard, www.eci.org

Fiebrand, Detlef: Farbensehen am Monitor. digit! 6-02, S. 22.

Funcke, J.: Großformatdruck: Eine Technik – viele Möglichkeiten. Publishing Praxis Sonderheft Output III 2000

Gerhardt, Thomas: Farbunterschiede beim Tintendruck. LARGE FORMAT 2/2001.

Gierling, Rolf: Farbmanagement. mitp-Verlag 2001.

Gerhardt, Thomas: Farben und Farbräume beim Tintendruck. LARGE FORMAT 3 und 4/2001.

Hamann, Kai: Schwarzweißes Handwerk. Herstellung optimaler Prints mit einem Tintendrucker. Computerfoto, Juli 2001.

Häßler, U.: Speichern, archivieren und transferieren. PHOTOGRAPHIE 11/98, S. 100.

Henning, P., A.: Taschenbuch Multimedia. Fachbuchverlag Leipzig, 2000.

101 http://www.hansbruemmer.de/tl_files/pdf-ordner/glossar.pdf

Hesse, Wolfgang; Schmidt, Marjen; Dobrusskin, Sebastian; Pollmeier, Klaus: Faustregeln für die Fotoarchivierung. Sonderheft 1 der Zeitschrift „Rundbrief Fotografie, 1997.

Hofmann, Rita: Farbmittel digitaler Ausdruckmedien: Drucktechnik und Haltbarkeit. Rundbrief Fotografie, Sonderheft 3.

Kopp, H.: Grundlagen der Farbmeßtechnik. Skript zum Lichttechnik-Labor. Fachhochschule Hannover, 2001.

Linotype-Hell, Eschborn: Die kreative Welt der digitalen Daten. Firmeninformation.

Ludwig, Joachim, Fa. European Ink, Hannover: Persönliche Mitteilung über die Zusammensetzung von Tinten.

Marchesi, J., J.: Lehrbuch der Digitalfotografie. Lektionen 1...20, veröffentlicht in PHOTOGRAPHIE, 1998...2000.

Marchesi, J., J.: Das Grundlagenseminar über die Fotografie. Veröffentlicht in PHOTOGRAPHIE ab 2000.

Microsoft Windows Platform Design Notes: sRGB64 and Windows Operating Systems. Designing Hardware for the Microsoft Windows Family of Operating Systems. Stand 27.03.2000.

Monteton, O.D., von: Was alternative Tinten in der Praxis leisten. Publishing Praxis Sonderheft Output III 2000.

Rubbert, Jens und Fuchs, Dietmar: Von der Aufnahme zum Print (Colormanagement) digit! 1-03, S. 12.

Rubbert, Jens: Vom Scanner zum Belichter. digit! 4-03, S.32 .

Schröder, G.: Technische Optik. Vogel-Verlag Würzburg, 1977.

Schurr, Ulrich: Digitale Bildverarbeitung. Vom Scannen bis zum Colormanagement. dpunkt.verlag Heidelberg, 2000

Schuster, N.: Geheimnisse der digitalen Fotografie. Photonik 4/2000-November, S. 40...45.

Solf, K., D.: Fotografie. Grundlagen, Technik, Praxis. Fischer Taschenbuch 3355, 1986.

Tillmanns, Urs: Geschichte der Photographie. Verlag Huber, Frauenfeld

Stuttgart, 1981

Wargalla, Henning: Farbkorrektur mit Photoshop und Scan-Programmen. MITP-Verlag Bonn, 2001.

Wüller, Dietmar: Farbechte Bilder vom Scanner bis zum Drucker. c't 2001, Heft 19, S. 124.

X-Rite, Köln: Die Sprache der Farben. Firmeninformation, 2000.